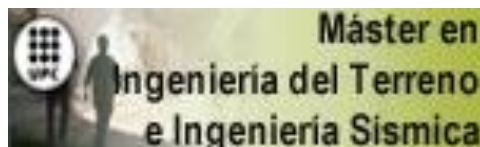


TRABAJO FINAL DE MÁSTER



TÍTULO

**CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS INALTERADAS DEL
DELTA DEL LLOBREGAT**

AUTOR

JONATAN VALERA CÓRDOBA

TUTOR

MARCOS ARROYO ALVAREZ DE TOLEDO

ESPECIALIDAD

INGENIERIA GEOTÉCNIA

FECHA

6 de Julio del 2016



**Dep. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

AGRADECIMIENTOS

Han sido cuatro largos años de Master, donde mi vida ha sufrido una gran cantidad de situaciones, y que finalmente llegan a su fin. Esto me ha permitido madurar, y descubrir aspectos de mí mismo que jamás había pensado que existieran. Es por ello, que en este apartado querría agradecerles a aquellas personas que han hecho posible el poder cumplir tan difícil tarea, y que han contribuido a que crezca interiormente en todos los aspectos.

Desearía agradecer a mi familia el apoyo que me han dado en estos años de duro trabajo, en todos los sentidos, donde siempre me han apoyado y me han dado un buen consejo.

A mi esposa, que nunca ha dejado que flaqueen mis fuerzas, sino que más bien me ayudaba a enfocarme, y siempre me animaba a continuar aunque no supiera por dónde ir.

A la Universidad Politécnica de Cataluña por permitirme estudiar en ella, y aprender una gran infinidad de conocimientos que estoy seguro que en un futuro no muy lejano, los utilizaré.

A mi tutor de tesina Marcos Arroyo, que siempre ha tenido paciencia conmigo, y ha sabido darme oportunidades, y alentarme a perfeccionar no solo como técnico, sino como persona.

A Nuria, por lo buena maestra que es, que sin ser de su responsabilidad, siempre estaba atenta a lo que realizaba, y me educaba en arte del Laboratorio.

A Víctor y Rodrigo, que los he vuelto locos, pero me han hecho aprender muchas cosas, y siempre han estado ahí para cualquier cosa que necesitara.

A los profesores del departamento por tener paciencia con ese joven que no paraba de preguntar para poder resolver todas las dudas que tenía.

A Daniel, Claudia, Manuel, Richard, y otros muchos compañeros y amigos, que he conocido en este lugar, y que siempre me estaban ayudando y sobre todo por las risas que nos echábamos.

Y finalmente a Dios, porque gracias a él he llegado donde estoy, y siempre ha estado a mi lado, y sin duda alguna, aun en la dificultad, me dio el regalo de poder realizar este Master.

RESUMEN

Como se han ido demostrando a través de diferentes casos, la construcción de edificaciones sobre subsuelos que se hallan en facias deltaicas muestran una gran complejidad, no tanto por la heterogeneidad de materiales, sino por su comportamiento y por la disposición espacial de estas tanto en vertical, como en horizontal. Uno de estos casos son las conocidas facias deltaicas del delta del Llobregat.

En este lugar se han realizado un gran número de edificaciones, como el puerto de Barcelona, la depuradora del río Llobregat, el aeropuerto del Prat del Llobregat y también una serie de estaciones y túneles de metro correspondientes a la nueva línea 9 del metro de Barcelona. A raíz de esta última se realizaron una serie de estudios de campo en la estación de Verge de Montserrat.

En este, no solo se realizaron una serie de sondeos para determinar la estratigrafía de la zona de construcción, si no que posteriormente procedieron a hacer una campaña de ensayos geotécnicos, centrados principalmente en SPT, CPTu y DMT, donde se obtuvieron una serie de parámetros que se utilizaron para realizar los cálculos a través de programas informáticos especializados.

Posteriormente se procedió la realización de una colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña, donde se extrajeron varias muestras inalteradas a diferentes niveles de la estación.

A través de esto, en este artículo se ha procedido a realizar una comparación a tres bandas, comparando los resultados que obtuvieron de la campaña geotécnica, los datos que se extrajeron de los ensayos de CPTu y DMT, y posteriormente los ensayos de laboratorio realizados a unos de los bloques muestra inalteradas. A través de esto, se podrá determinar la composición del subsuelo, la disposición espacial de los estratos, y su comportamiento mecánico.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	5
ÍNDICE.....	7
Capítulo 1: Introducción.....	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Objetivos	10
1.3 Estructura del trabajo.....	10
Capítulo 2: Descripción del caso	12
2.1 Introducción	12
2.1.1 Contexto Geográfico	12
2.1.2 Contexto Geológico.....	13
2.2 Reconocimiento geotécnico en el emplazamiento	15
2.2.1 Introducción	15
2.2.2 Campañas Realizadas	15
2.2.3 Ensayos “In situ”	17
2.2.4 Metodología de análisis	19
2.2.5 Perfil estratigráfico	21
2.2.6 Caracterización Geotécnica	22
2.3 Extracción de las muestras inalteradas	25
2.3.1 Introducción	25
2.3.2 Contexto	25
2.3.3 Modo de Extracción	26
ESTUDIO DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	32
Capítulo 3. Material utilizado para la investigación	33
3.1 Introducción	33
3.2 Origen de las muestras	33
3.3 Cuarteo de la muestra	33
3.4 Resultados del procedimiento.....	37
Capítulo 4. Descripción de equipos	40
4.1 Ensayos de Caracterización	40
4.3 Ensayo de Corte Directo (CD).....	40
4.3.1 Equipo	40
4.3.2 Metodología	41

4.4 Ensayo Edométrico	41
4.4.1 Equipo	41
4.4.2 Metodología	42
Capítulo 5. Resultados Experimentales	44
5.1 Caracterización.....	44
5.2 Resultados de los Ensayos Edométricos	48
5.2.1 Resumen	53
5.3 Resultados Ensayo de Corte Directo	56
5.3.1 Introducción	56
5.3.2 Resultados.....	56
ESTUDIO DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS “IN SITU”	62
Capítulo 6. Análisis de los datos de los ensayos CPTu	63
6.1 Introducción	63
6.2 Análisis estratigráfico.....	64
6.2.1 Introducción	64
6.2.2 Datos disponibles	67
6.2.3 Aplicación de la clasificación de Robertson	70
6.2.4 Aplicación de la clasificación de Schneider.....	78
6.3 Análisis del Grado de Sobreconsolidación del suelo (OCR)	83
6.3.1 Introducción	83
6.3.2 Aplicación al caso	84
6.4 Obtención del E de los ensayos de CPTu	86
6.4.1 Introducción	86
6.4.2 Aplicación al caso	87
6.5 Comparación de los resultados “in situ” con los de laboratorio	88
6.5.1 Introducción	88
6.5.2 Análisis de la estratigrafía	88
6.5.3 Análisis de Sobreconsolidación de los suelos (OCR)	91
Capítulo 7. Análisis de los datos de los ensayos DMT	92
7.1 Introducción	92
7.2 Estratigrafía	93
7.2.1 Introducción	93
7.2.2 Aplicación al caso	94
7.3 Análisis del Grado de Sobreconsolidación (OCR).....	99
7.3.1 Introducción	99
7.3.2 Aplicación al caso	100

7.4 Análisis del Módulo Elástico (M_{DMT})	101
7.4.1 Introducción	101
7.4.2 Aplicación al caso	101
7.5 Comparación de los resultados “in situ” con los de laboratorio	102
7.5.1 Introducción	102
7.5.2 Análisis de la estratigrafía	102
7.5.3 Análisis del grado de sobreconsolidación (OCR)	103
7.5.4 Análisis del Módulo Edométrico	104
Capítulo 8. Conclusiones.....	105
REFERENCIAS.....	106

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

El delta del Llobregat ha sido estudio de manera extensa a lo largo de los años, desde diferentes puntos, como la hidrogeología, por la posible contaminación del río por vertidos por parte de las empresas. De forma geológica, por presentar de manera clara la ejemplificación de facies deltaicas, y como no de aspectos geotécnicos. Pero este hecho de hallar una gran cantidad de bibliografía, no da solución a la dificultad que hay para caracterizar ciertos niveles de vital importancia en algunos casos.

Los materiales limosos y arenosos del delta del Llobregat tienen importante repercusión geotécnica sobre las obras realizadas en esa zona, obras que comprenden algunas de las infraestructuras más importantes de España (aeropuerto del Prat, Puerto de Barcelona,...). Estos materiales son muy difíciles de muestrear por métodos convencionales y su caracterización geotécnica suele hacerse casi exclusivamente mediante ensayos “in situ”. Con ocasión de la construcción de la L9 de TMB y en el marco de un proyecto de investigación en el que participó el Departamento de Ingeniería del Terreno, se obtuvieron varias muestras bloque durante la excavación de la estación “Verge de Montserrat”. Estas muestras ofrecían una oportunidad única para la caracterización geotécnica de estos materiales.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo consistiría en utilizar las muestras inalteradas que se extrajeron en la estación de Verge de Montserrat de la línea 9 del metro de Barcelona y los datos de los ensayos “in situ” que se realizaron, y proceder a realizar una serie de ensayos para cumplir los siguientes objetivos:

- Determinar la densidad “in situ” de los materiales extraídos.
- Medir su compresibilidad edométrica.
- Determinar su tensión de preconsolidación.
- Medir su resistencia a corte.
- Realizar el análisis estratigráfico a través de los ensayos “in situ”
- Obtener el parámetro de OCR y el módulo edométrico a través de los datos de los ensayos “in situ”.
- Comparar los resultados de laboratorio con respecto a los de campo.

1.3 Estructura del trabajo

La presente tesina viene estructurada en seis capítulos a saber:

En el capítulo 2 “Descripción del caso” se centra en describir la situación de la estación, tanto la geográfica como la geológica. También se comenta de manera resumida la campaña realizada en dicha estación y el modo de extracción de las muestras inalteradas, y las características de estas, según el conjunto de la zona.

En el capítulo 3 “Material Utilizado en los Ensayos” en este apartado se concretan los materiales que ensayaron en el laboratorio, narrando el porqué de la elección de estos bloques hasta el proceso de cuarteo

En el capítulo 4 “Descripción de equipos” se describe la maquinaria que se procederá a realizar en el laboratorio.

En el capítulo 5 “Resultados Experimentales” se presenta la metodología de trabajo que se ha utilizado, los datos obtenidos y el trabajo posteriormente que he realizado con ellos.

En el capítulo 6 “Análisis de los datos de los ensayos CPTu”, en este capítulo se analizan los datos obtenidos de los ensayos CPTu, para obtener los diferentes parámetros marcados en los objetivos.

En el capítulo 7 “Análisis de los datos de los ensayos DMT” “en esta sección se realiza la misma acción comentada en el anterior capítulo, pero en los ensayos de DMT.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones de la tesina y posibles ideas para posteriores estudios.

Capítulo 2: Descripción del caso

2.1 Introducción

Este capítulo se centra en la revisión de los datos y documentos referentes a las muestras inalteradas. En la primera parte se detalla donde se extrajeron las muestras inalteradas, su contexto, tanto geográfico como geológico, y una explicación sobre la construcción de la estación de Verge de Montserrat, para ver los ensayos “in situ” que se procedieron.

En la segunda parte, me habla específicamente en las muestras inalteradas. En este apartado se explica las formas de extracción que se utilizaron, y al llegar al laboratorio, el modo de desfragmentación que se procedió de los bloques muestra que utilizaron en anteriores estudios. Posteriormente se expondrán las características de las muestras que mostraron los anteriores artículos.

2.1.1 Contexto Geográfico

El punto de origen de las muestras extraídas correspondería a una de las estaciones que se están realizando de la L9 para enlazar el centro de Barcelona con el Aeropuerto. Dicha estación correspondería a la Verge de Montserrat, situada en el municipio del Prat de Llobregat. El municipio se hallaría en la comarca del Baix Llobregat, en la provincia de Barcelona, formando parte del área metropolitana de dicha ciudad condal. Esta ciudad de 32.23 km² es limitada por las ciudades de Barcelona, l'Hospitalet de Llobregat, Cornellà de Llobregat, Sant Boi de Llobregat y Viladecans. El terreno de dicha localidad se halla prácticamente plano, y su altitud máxima es de 8 metros. En la figura posterior se observa la localización de la estación de Verge de Montserrat.

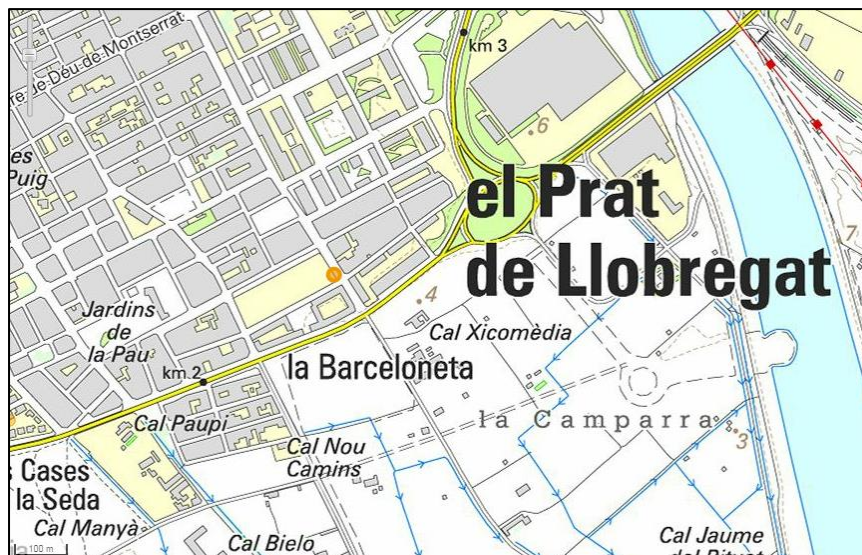


Fig. 1 Mapa topográfico 1:25000 del municipio del Prat de Llobregat, con marcación de la estación de metro Verge de Montserrat.

Las coordenadas (en decimal) de la estación correspondería a: 41.3294⁰/2.10323⁰.

2.1.2 Contexto Geológico

Según el mapa geológico 1:25000 del Baix Llobregat realizado por el Instituto Geográfico de Cataluña, el Prat de Llobregat y la ubicación del metro se emplazan sobre los sedimentos detríticos de edad cuaternaria, que conforman el delta del Llobregat. El delta forma una gran llanura de poco menos de 100 km² que se apoya, bien sobre los materiales pliocenos de la antigua ría, como en los materiales más antiguos de las orillas: Mioceno cerca de Montjuic, Triásico en Gava, Paleozoico en Sant Boi, etc. El Delta está formado por dos niveles detríticos arenosos, separados por un nivel de materiales limo-arcillosos que se acuña hacia el valle y hacia los bordes. El nivel detrítico superior se encuentra, en la actualidad, prácticamente cubierto por suelos. Si bien es predominante arenoso, el nivel detrítico inferior presenta, de forma discontinua un tramo de gravas de mayor potencia (de hasta 10m).

Con respecto a la estación de metro de Verge de Montserrat, los materiales excavados varían entre arenas finas ($z < 10\text{m}$) y arcillas en profundidad. El perfil estratigráfico está compuesto por una capa de relleno antrópico en superficie ($\approx 10\text{m}$) de arena fina de color gris con presencia de gravas subyacida por una capa de arcillas y limos de 12m de espesor aproximadamente. A continuación, se presenta una capa de arcilla combinada con limos en la cual termina la pantalla de hormigón, construida para realizar las obras de la estación.

2.2 Reconocimiento geotécnico en el emplazamiento

2.2.1 Introducción

Para la determinación de las características y parámetros geotécnicos del terreno en la zona de interés, se dispuso de varios reconocimientos geotécnicos (sondeos mecánicos a rotación y ensayos “in situ”) realizados en la zona del entorno más próximo a la estación, así como los resultados de los ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas en los sondeos. Los reconocimientos se llevaron a cabo en diferentes campañas.

Por otra parte, debe indicarse que la caracterización de Proyecto se englobó dentro de un proyecto más grande (el del tramo correspondiente de la Línea 9). Así, quienes redactaron proyectos y estudios sobre él, tuvieron en cuenta las tendencias observadas en el conjunto de los datos demandados en las campañas globales realizadas para la totalidad del tramo. De este modo se considera la variabilidad geológica natural del trazado, y se busca evitar errores debidos al carácter puntual de los reconocimientos y de los ensayos de campo y laboratorio disponibles.

Se tuvo en cuenta, en cualquier caso, como se ha venido estableciendo a la luz del marco general geológico - geotécnico en el que se inscribe el trazado general en estudio, que las unidades permeables superiores (arenas del frente deltaico) y la inferior (gravas basales) sí que tienen carácter marcadamente granular.

Pero los niveles comprendidos entre ambos, son una mezcla de materiales arcilloso, limosos y arenosos, con predominios alternativos de los unos y los otros, los límites de los cuales son muy difíciles de diferenciar en la práctica.

2.2.2 Campañas Realizadas

Para realizar la estación de Verge de Montserrat de la L9, se tuvieron que obtener los parámetros característicos de los niveles del subsuelo, para diseñar de manera correcta dicha obra. Para ello se llevaron a cabo una serie de reconocimientos en diferentes etapas. En la primera etapa del proyecto, se procedió a realizar:

1. Dos sondeos a rotación con recuperación continua de testigos (*SM 0.14 y S3.9 (fig. 4)*).
2. Un ensayo de CPTu, (*P-2 citado en la fig.4*).

A raíz de querer obtener un estudio más exhaustivo sobre el comportamiento de los suelos al realizar la construcción y sus características hidrogeológicas, la UTE llevo a cabo una campaña complementaria de reconocimientos en el emplazamiento de la estación, la cual comprendía:

3. Tres sondeos a rotación continua con recuperación continua de testigo (*SA, SB, SC en la figura 4*).
4. Dos ensayos más de CPTu (*D y E en la Fig. 4*).
5. Cuatro ensayos dilatométricos de Marchetti DMT. (*H, J, F y G en la figura 4*)

Toda la información se resume en la siguiente tabla.

		Otra Nomenclatura	Fecha ejecución	Proyecto
SONDEOS	SM-014		20/09/2000	M2
	S.3.9		04/07/2003	M2
	A	S.DO5	28/05/2008	A.C.
	B	S.DO6	02/06/2008	A.C.
	C	S.DO7	03/07/2008	A.C.
CPTU	P-2		28/09/2006	M2
	D	CPTU01	25/06/2008	A.C.
	E	CPTU02	07/07/2008	A.C.
DMT	F	DMT 01	26/06/2008	A.C.
	G	DMT 02	03/07/2008	A.C.
	H	DMT 04	07/08/2008	A.C.
	J	DMT 03	06/08/2008	A.C.

Fig.3 Tabla de ensayos in situ

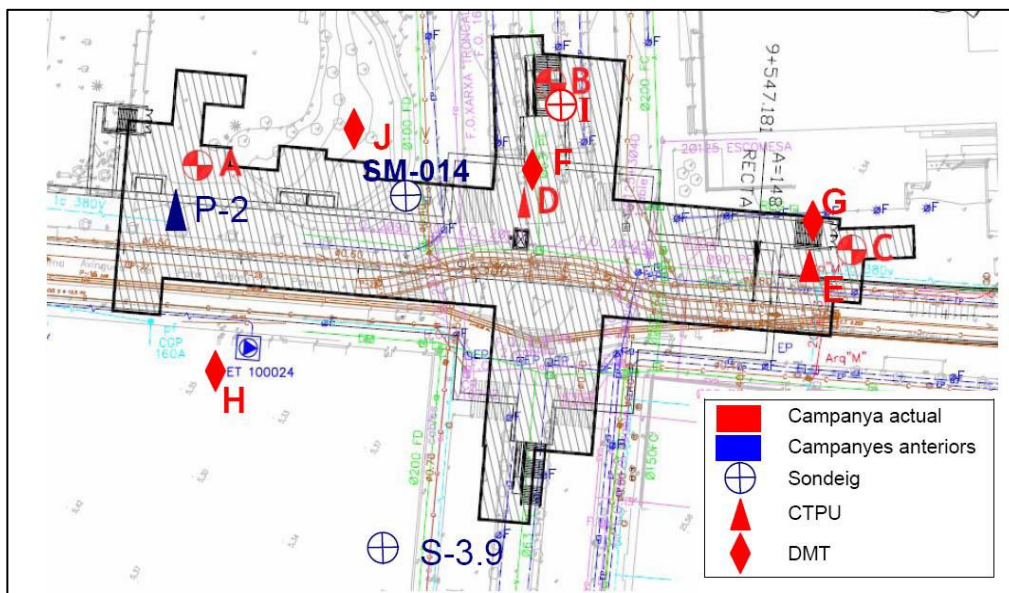


Fig. 4 Reconocimientos disponibles en el emplazamiento de la estación.

2.2.3 Ensayos “In situ”

Ensayo dilatométrico de Marchetti (DMT)

El Dilatómetro Plano de Marchetti (DMT) consiste en una paleta plana que se hince en el terreno y está provista de una fina membrana metálica circular, expandible horizontalmente en el suelo mediante gas a presión.



Fig.5 Dilatómetro

La hincada de la paleta en el terreno se realiza mediante penetración estática, utilizando para ello los mismos camiones que se utilizan para la realización de ensayos de penetración estática y piezoconos. El varillaje utilizado es el mismo que el de estos ensayos.

La paleta se conecta a una unidad de control en superficie mediante una manguera de presión de nylon en cuyo interior contiene un cable eléctrico que transmite las señales. La manguera y cable discurre por el interior de las varillas de hincada, que son huecas.

A intervalos de 20 cm se detiene la penetración y la membrana es inflada mediante gas presurizado. Se toman dos lecturas: A, que corresponde a la presión necesaria para comenzar a mover la membrana, y B, que es la presión requerida para producir una deformación de 1,1 mm en el terreno. El desplazamiento de la membrana de la paleta es de $1,1 \pm 0,02$ mm y tratándose de piezas sólidas, no puede ser alterada en modo alguno por el operador.

A partir de ello obtendremos los valores de P_0 y P_1 se derivan los tres parámetros intermedios característicos de este ensayo:

- I_d , Material Index, relacionado con el tipo de suelo.
- K_d , horizontal stress index, relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR).
- E_d , módulo dilatométrico, determinado a partir de la teoría de la elasticidad.

De forma abreviada, a partir de los parámetros comentados anteriormente, pueden estimarse los parámetros geotécnicos clásicos de resistencia, deformabilidad e historia tensional de un suelo:

- Tipo de suelo (estratigrafía).
- OCR y K_0 en arcillas.

- C_u en suelos cohesivos.
- $DR\%$ y ϕ en suelos granulares.
- M_{DMT} (módulo Edométrico) en suelos granulares y cohesivos.

Ensayo de penetración estática y piezocono (CPTu)

Este ensayo mide la reacción del suelo ante la penetración continua de una punta cónica mediante dos parámetros: la resistencia de punta (q_c) y el rozamiento lateral (f_c). La instalación de un sensor adicional de la presión intersticial constituye un equipo denominado piezocono (CPTu) que además de registrar q_c y f_c , registra las presiones intersticiales, u , que se van generando durante la hincada.



Fig.6 Penetrómetro

El ensayo de penetración estática consiste en hincar en el suelo una punta cónica a presión y a velocidad constante midiendo el esfuerzo necesario para la penetración del cono, q_c . Si se emplea un cono de tipo móvil se puede medir el rozamiento lateral local, f_c , y en el caso de utilizar un piezocono se registrará la presión intersticial que se va generando durante la hincada.

Los ensayos de penetración estática se realizan en suelos granulares y en suelos cohesivos de consistencia blanda. La presencia de bolos, gravas, suelos cementados y roca produce rechazo y daños en los equipos. Estos ensayos se utilizan para el cálculo de cimentaciones, y proporciona información continua del terreno ensayado.

A partir de los datos obtenidos se pueden establecer correlaciones con otros parámetros geotécnicos, algunas de las cuales corresponderían:

- Con el ángulo de rozamiento interno para suelos granulares.
- Con el módulo de Young, E para suelos granulares
- Resistencia al cono-fricción lateral.
- Densidad relativa.
- Ángulo de fricción.
- Resistencia al corte sin drenaje (Cu).
- Coeficiente de consolidación.
- Grado de sobreconsolidación.

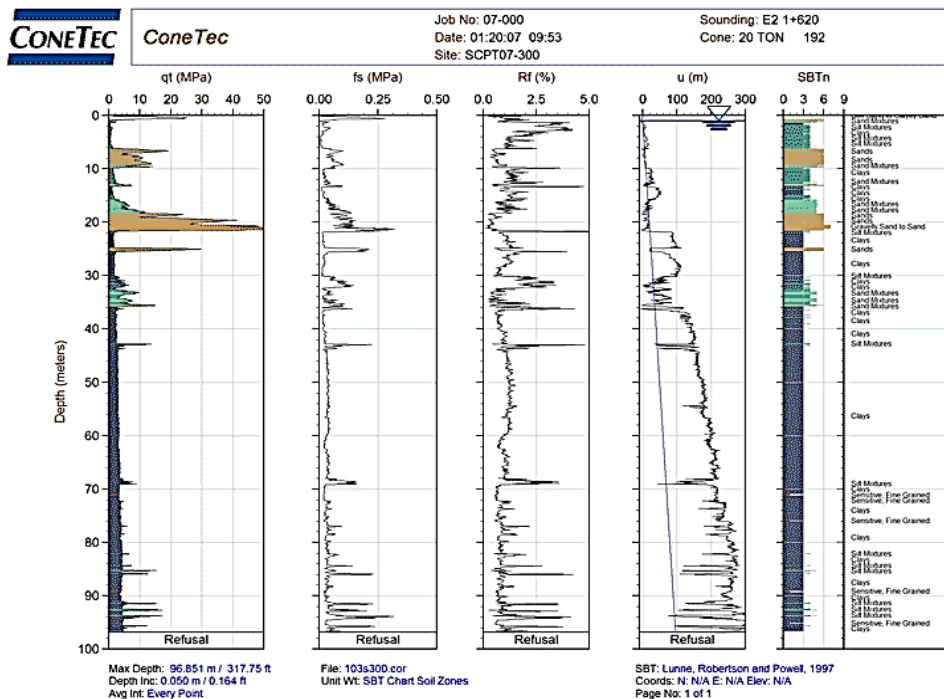


Fig.7 Perfiles obtenidos del penetrómetro

2.2.4 Metodología de análisis

El conjunto de resultados y datos de ensayos sirvieron para obtener la estratigrafía del lugar y las características geotécnicas del terreno en proyecto. Así que, con lo que respecta al análisis de los resultados obtenidos en los ensayos que se obtuvieron, se utilizaron distintas correlaciones para determinar finalmente los parámetros geomecánicos que son necesarios para definir los modelos de cálculo.

En este sentido, a partir de los índices N de los ensayos SPT que se realizaron en los sondeos, para los materiales granulares se utilizó la expresión propuesta por Muromachi (1974) para determinar el ángulo de rozamiento interno:

$$\phi' = 20 + 3,4\sqrt{N}$$

Los valores del índice de penetración fueron los corregidos por efecto de la profundidad y del nivel freático.

Para niveles arcillosos, cohesivos se determinaron los valores de la resistencia al corte no drenado, mediante la expresión de Robertson y Campanella:

$$C_u = (Q_t - \sigma_{vo})/16$$

donde Q_t es la resistencia para la punta obtenida en los ensayos de penetración estática, y σ_{vo} es la presión vertical total a la profundidad correspondiente.

El coeficiente 16 se escogió en función del tipo de suelo cohesivo aquí presente, de baja-media plasticidad y, contenidos limosos y arenosos variables, no menospreciables.

Des del punto de vista del análisis de los datos aportados por los ensayos de piezocono, como presenta un número mayor de ensayos con respecto a los ensayos SPT disponibles, se efectuó un estudio a fin de asociar a estos valores de CPTU con los valores de los índices N asociados que les correspondería.

Es por ello que se ha partido por una parte de la correlación dada por Robertson $Q_t = \eta N_{SPT}$, variando este coeficiente en función del tipo de suelo. Obteniéndose de este modo parejas de valores de N (reales y/o deducidos por correlación) y de los correspondientes coeficientes η (de los datos reales del ensayo de piezocono, y de los deducidos).

De esta forma, analizando el conjunto de los datos de todo el tramo en general, y en particular, de los contemplados en esta estación, es posible atribuir a las distintas unidades geotécnicas determinados valores de este coeficiente de correlación, y que permiten obtener una familia más extensa de valores deducidos de la resistencia al corte y de la deformabilidad.

Para obtener el módulo de deformación E de los materiales granulares, según Beguemann (1974) se aplicó la correlación siguiente:

$$\text{Para } N < 15 \quad E = 12(N+6)$$

$$\text{Para } N > 15 \quad E = 40 + 12(N-6)$$

estando expresado E en kPa/cm^2 .

Por otro lado, para suelos arcillosos, la deformabilidad a corto plazo se puede obtener a través del valor deducido de la resistencia al corte sin drenaje, mediante la expresión $E = \alpha C_u$. El valor del coeficiente de proporcionalidad oscila entre 200 y 500, y para el caso presente, en función del tipo de terreno que se trata, se adoptó un valor de $\alpha=300$.

A partir de esto, se determinó el módulo de deformación en tensiones efectivas por medio de la relación basada en el coeficiente de Poisson, por el cual se adopta un valor de 0,3 para estos materiales finos.

Por medio de esta metodología, el tratamiento y análisis de los datos obtenidos en los resultados de los ensayos efectuados, se determinaron los resultados expresados en los siguientes apartados.

2.2.5 Perfil estratigráfico

A raíz de lo comentado en el apartado anterior, se procedió a realizar una descripción de los materiales que componen la zona de la estación de Verge de Montserrat.

- Relleno Antrópicos

Se trata de materiales producto de la actividad humana, formados de una mezcla de arena, gravas y finos, en los que presenta de forma esporádico a material de construcción. Presenta una potencia de 3m.

Al realizarle un ensayo de identificación y estado, se observa que la fracción arenosa predomina frente la fina, con presencia esporádica de alguna gravilla. La fracción fina no es plástica, obteniéndose para esta muestra una clasificación de SM según Casagrande.

- Arenas del frente deltaico (QL1-QL2)

Este nivel está constituido por las unidades QL1 y QL2, caracterizado la primera por tonalidades marrones y presencia de materiales de granulometría más fina, y la segunda de estas por tonalidades más grises y para presentar esporádicamente niveles de gravilla.

Presentan una potencia media de 11m, de naturaleza granular, compuesta por una mezcla de arenas medias y gravilla de cuarzo redondeadas, y con presencia ocasional de restos biológicos.

Los niveles de granulometría más grande se hallan entre los 6.8m de profundidad, pasando de forma gradual más arenosa y finalmente arcillosa

Los finos analizados mostraron comportamientos no plásticos generalmente, a excepción de los tramos cohesivos, que presentan cierto grado de consistencia.

Se obtienen por tanto, clasificaciones según Casagrande de SP Y SM, fundamentalmente y ML en los casos de los niveles más cohesivos.

- Limos y arcillas de la cuña limosa intermedia

- Unidades QL3-QL3m

Se trata de una formación fundamentalmente cohesiva, arcilla-limosa, pero se presentan niveles intercalados más arenosos y de potencia variable.

Dentro de esta formación se aprecia un tramo puramente cohesivo y de buena continuidad que se desarrolla des de los 25 a los 36m, i donde en el ensayo de penetración CPTU que se realizó se aprecia un fuerte incremento de la presión hidrostática.

En este tramo anterior, se corresponden con niveles básicamente arcillosos, donde se registraron una mayor proporción de finos. Se asocia a este nivel a la unidad QL3m, correspondiente a un nivel limoso arcilloso con intercalaciones limo-arenosas.

- Unidad QL3s

Corresponde a una formación de limos bastante arenosos, de tonalidades grises, con intercalaciones arenosas y esporádicamente niveles arcillosos-limosos. Se presentan en la zona de la estación a profundidades entre 36-41m. Son suelos fundamentalmente de naturaleza granular-coherente, con porcentajes de limos y arcillas no menospreciables.

- Unidad QL4 de gravas basales

Son arenas medias de tonalidades marrones con intercalaciones de gravas y arenas finas, con apariciones esporádicas de niveles más limosos. Se halla en la zona de la estación a una profundidad media de 43m.

Son escasos las muestras obtenidas en esta unidad dadas las características del terreno, no obstante, se conoce que la fracción dominante serían las gravas.

2.2.6 Caracterización Geotécnica

En los siguientes gráficos presentamos los perfiles litológicos que se obtuvieron de los ensayos de CPT_U y DMT. En la figura 5, muestra los resultados que se obtuvieron el campo, donde podemos observar los valores que se obtuvieron de la resistencia de la punta, donde también tenía una piedra porosa con que medir los valores de presiones del agua, y así obtendremos las tensiones efectivas.

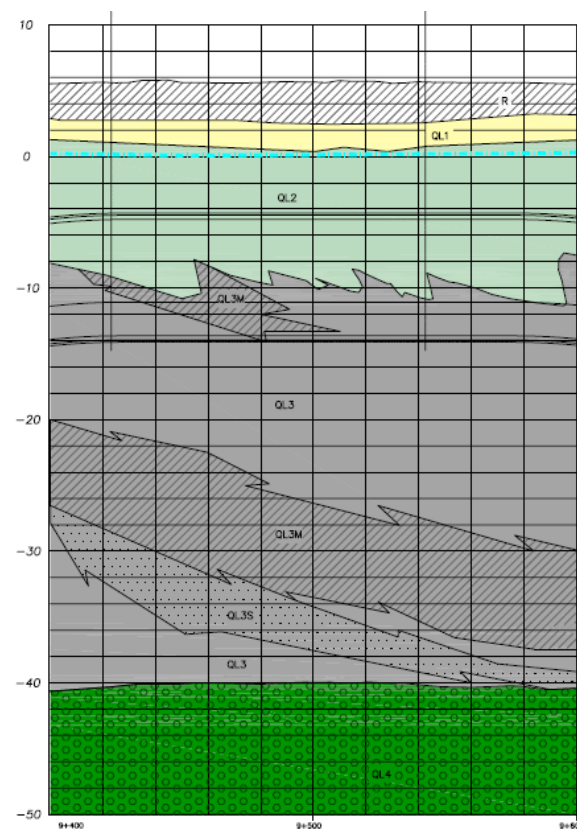


Fig.8 Corte geológico de la estación

La figura 6 muestra el perfil de terreno que se obtuvo de realizar el ensayo dilatométrico de Marchetti (DMT), registrando los valores de resistencia, que posteriormente se buscó correlaciones para procesarlo.

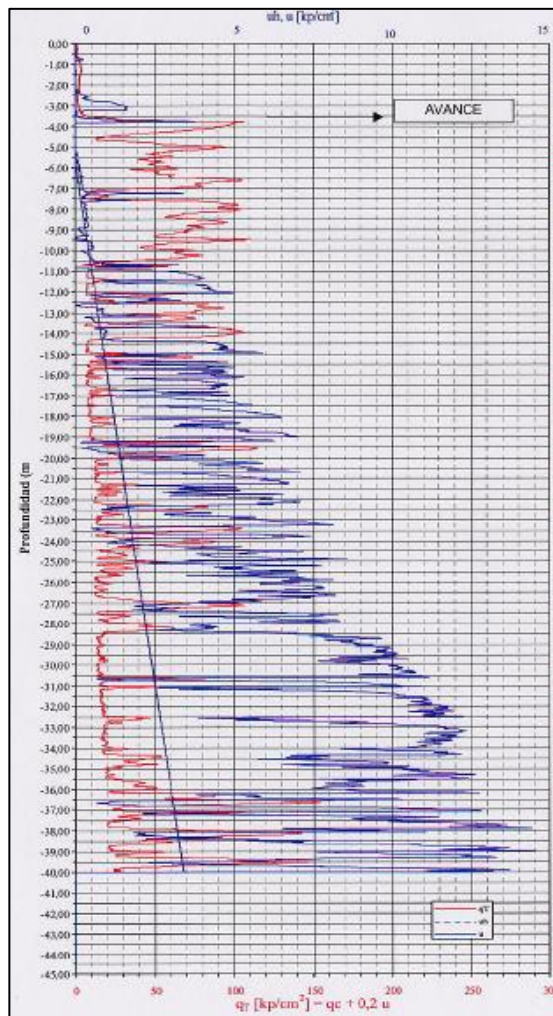


Fig.9 Perfil geotécnico del CPTU

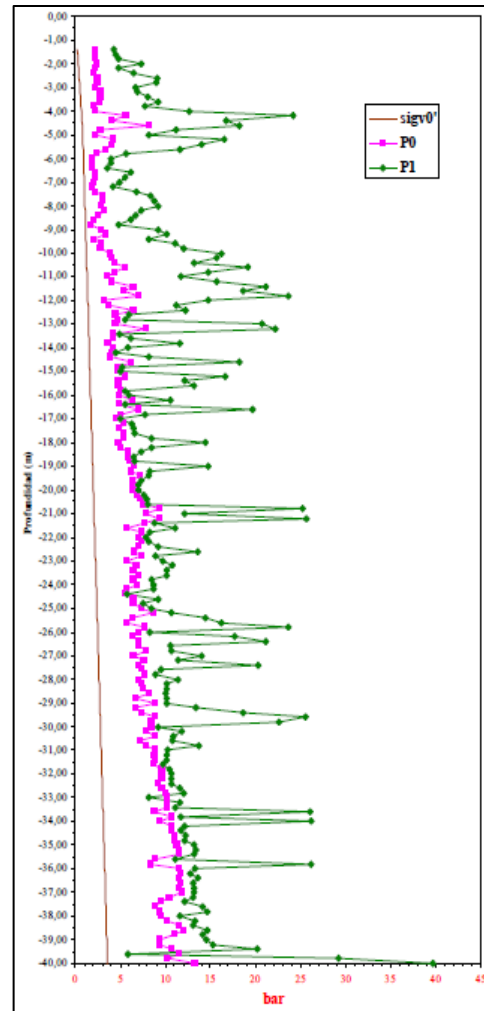


Fig.10 Perfil geotécnico del DMT

A partir de esto, se mostraran los parámetros geotécnicos que se determinaron para el proyecto original.

- Relleno antrópico

No se realizaron en la zona concreta de este sector y en este nivel, ensayos concluyentes a determinar los parámetros de resistencia intrínseca; no obstante, podemos adoptar razonablemente los siguientes parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento interno dado por la experiencia se tienen a lo largo de las sucesivas campañas realizadas:

$$C' = 0$$

$$F = 25^\circ - 27^\circ$$

- Arenas del frente deltaico (QL1 y QL2)

Se han realizado un ensayo de corte directo CD en el que se obtuvo un valor de la cohesión ($c' 0,0 \text{ kg/cm}^2$) y un ángulo de rozamiento interno de $\phi' = 34,5^\circ$.

Otra forma de obtener el ángulo de rozamiento interno es mediante correlaciones con el ensayo SPT. De acuerdo a estas expresiones, y con los valores medidos de los ensayos SPT realizados, se obtiene un ángulo de rozamiento interno 30° y 34° .

Para el valor medio del índice N_{SPT} , se obtiene un módulo de deformación del orden de 220 kg/cm^2 .

- Limos y arcillas de la cuña limosa intermedia

- Unidades QL3-QL3m

En esta estación, se obtuvieron valores de la resistencia por punta Q_t en el penetrómetro del orden de 20 a 50 kPa/cm^2 , y del índice N del SPT en torno a 10 - 15 golpes/ 30 cm .

En el único ensayo estilo directo CD, se obtuvo un valor de la cohesión de $c' = 0,58 \text{ kPa/cm}^2$, con un ángulo de rozamiento interno de $\phi' = 15,5^\circ$ sobre una muestra arcillosa con un 95% de finos.

El valor medio del coeficiente de correlación η ha sido de $2,9$; indicando una buena consonancia con las características de este nivel QL3-QL3m, que muestra un carácter marcadamente arcilloso. Su consistencia, de acuerdo con los valores de Q_t y los índices del SPT, sería de tova.

Con respecto a parámetros de deformación, a partir de los valores de la resistencia al corte sin drenaje, puede determinarse el módulo de deformación mediante la expresión $E_u = 300 C_u$. Y se obtienen por tanto, para que este nivel blando, un rango de valores del módulo de deformación del orden de $E_u = 140$ - 270 kg/cm^2 . A partir de aquí, para el módulo de deformación en tensiones efectivas se obtiene valores del rango de $E' = 120$ a 230 kPa/cm^2 .

- Unidad QL3s

En la estación de la Mare de Deu de Montserrat se han obtenido valores de la resistencia para la punta Q_t en el penetrómetro estático del orden de 50 a 60 kPa/cm^2 , con un valor elevado en el único ensayo de SPT realizado ($N_{30} = 44$).

El valor medio del coeficiente η ha sido de $3,6$; indicando una buena consonancia con las características de este nivel QL3s aquí presente, que muestra un carácter de una significativa componente arcillosa.

En consecuencia, la resistencia al corte se ha caracterizado por un ángulo de rozamiento interno de $\phi' = 31^\circ$ - 35° . Los parámetros de deformabilidad, según la expresión de Begueman, el valor del módulo de deformación obtenido en función de los valores asignables a los índices SPT correspondientes, serían del orden de hasta 300 kPa/cm^2 .

- Unidad QL4 de gravas basales

En este nivel no se procedió a realizar una gran investigación de los parámetros geotécnicos, por tanto la información obtenida viene dada por algún ensayo e información de otros informes.

El valor medio de los ensayos SPT, que se han hecho en este nivel, presenta un rango de $NSPT = 40$, obteniéndose mediante correlación de Beguermann un módulo de deformación de $E' = 450 \text{ kPa/cm}^2$.

Para el ángulo de rozamiento interno, según las correlaciones antes citadas en función del N_{SPT} , se obtendrían valores del orden de $\phi' = 36^\circ - 38^\circ$.

En resumen, para poder ver y comparar los valores entre las diferentes capas, en el siguiente cuadro se muestra la recopilación de los parámetros que se obtuvieron de cada nivel estratigráfico.

Unidad	Cotas	E' (kPa/cm2)	v'	c' (t/cm2)	ϕ'	Yd (t/m3)	Yap (t/m3)	Ysumergida (t/m3)	SPT	Cc	Cs
Relleno	+5,5 a +2,5	30-40	0,3		25°	1,6	1,7	1			
QL1	+2,5 a +0,5	150	0,3	0,5	29°	1,60-1,65	1,8	1	10		
QL2	+0,5 a -8,2	200	0,3	0,5	30°	1,65-1,70	2	1,04	14		
QL3-QL3m	-8,2 a -30,2 -37 a -40	125-250	0,35	1,5	28°	1,50-1,60	1,7	0,96	10-16	0,15	0,02
QL3s	-30,2 a -37	175-300	0,3	0,5	33°	1,60-1,65	1,9	1		0,125	0,015

Fig.11 Tabla de Parámetros Geotécnicos de la campaña de muestreo realizado por Igeotest.

Estudios posteriores, han hecho un uso más sistemático de los resultados de CPTu y DMT para caracterizar el emplazamiento.

2.3 Extracción de las muestras inalteradas

2.3.1 Introducción

A continuación se resume el informe de extracción de las muestras bloque de arena y arcilla en la estación Verge de Montserrat, realizado por Jubert Pineda, para documentar que las condiciones precisas en que se hallaban las muestras, en su medio, en su proceso de extracción, y en posteriores apartados en el laboratorio

2.3.2 Contexto

En este informe se observa las diferentes muestras bloque inalteradas que se extrajeron de la estación. Como indica el autor, ya se concibió el muestreo de forma que se pudiesen comparar los resultados de campo con los de laboratorio a raíz de extremar las precauciones con la extracción de dichas muestras. Es por eso que se trajeron los bloques de los sectores 3 y 6 (figura 12) que son donde se realizaron los ensayos de campo. La siguiente tabla presenta un resumen de las muestras bloque indicando su profundidad y el sector de procedencia, siendo estas extraídas entre los meses de abril y agosto de 2010.

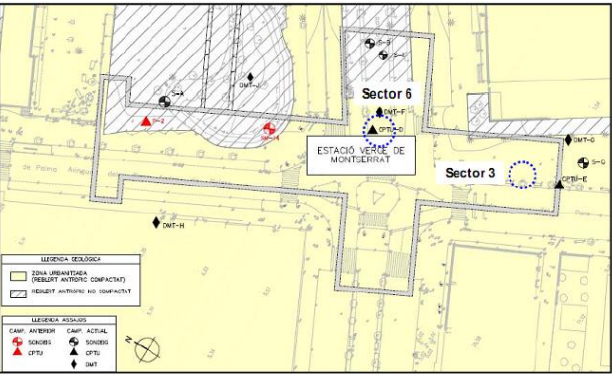


Fig.12 Zona de realización de los ensayos

Bloque	Sector	Profundidad (m en masl)	Fecha de Extracción
1	3	-3/-4	14/04/2010
2	6	-3/-4	28/04/2010
3	3	-7/-8	07/07/2010
4	6	-7/-8	21/07/2010
5	6	-10/-11	16/08/2010
6	3	-13/-13,5	23/08/2010
7	6	-13/-13,5	31/08/2010

Fig.13 Tabla de Bloques muestra extraídos.

2.3.3 Modo de Extracción

El método de extracción de las muestras bloque fue realizado a través de una metodología de extracción, muy metódica, debido a que en este proyecto se buscaba la mayor inalterabilidad de las muestras, para obtener los parámetros más fiables posibles. Sin embargo, el procedimiento de tallado, cubrimiento y corte de las muestras, fue realizado de manera específica, debido a que no existe ninguna norma Standard para el muestreo tipo “bloque” en arenas, realizando similitudes y adaptaciones con las normas que existen para las arcillas. Debido a este hecho, los técnicos decidieron no realizar la típica forma de bloque cuadrada, sino que optaron por tallarlos de forma cilíndrica, que presenta una mayor estabilidad.

Las etapas de extracción de las muestras, consistían en:

1. Excavación y preparación del terreno.
2. Tallado de las muestras.
3. Recubrimiento y parafinado.
4. Corte y parafinado de la base.
5. Transporte y almacenamiento.

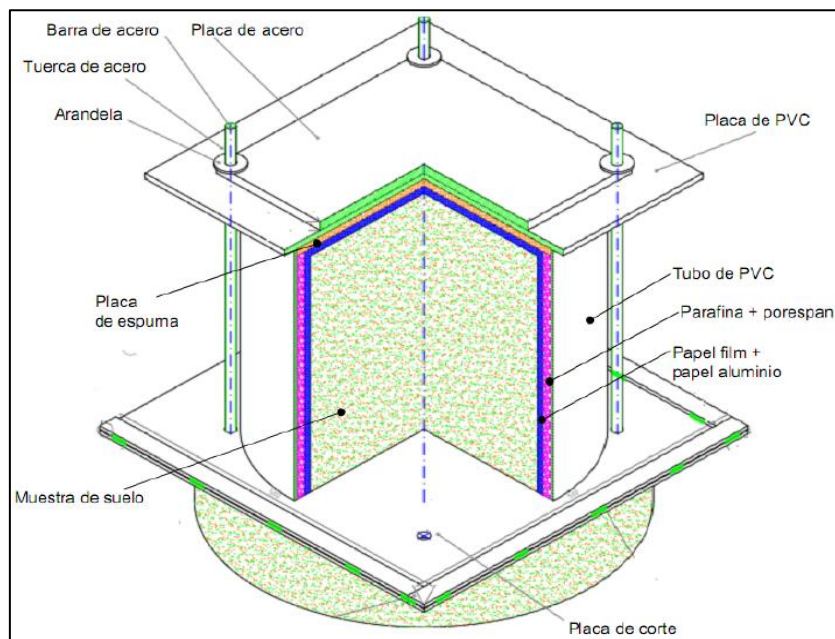


Fig. 14 Condición final del proceso de muestreo.

Como nos expone el autor (Jubert et al), esta metodología se realiza para disminuir la alteración de las muestras en su humedad y temperatura, y también para protegerlas de las alteraciones externas y la manipulación del laboratorio.

- Excavación

La metodología de trabajo que se procedió para extraer las muestras, (*descrita por J. Pineda*), consistió en la excavación de una zanja de un 1m de profundidad para el tallado posterior de la muestra bloque, utilizando una excavadora de pala pequeña.

El planteamiento de excavación fue realizado en dos tipos de metodología de excavación realizados, dependiendo del espacio disponible para el movimiento de la excavadora. En el caso de las muestras obtenidas del sector 3 a profundidades de -3m y -7m (en msla), realizaron una zanja cuadrada de 1 m de ancho similar, produciendo un cubo de terreno natural de 1m de lado del cual se talló la muestra bloque. En el resto de muestras, solamente se excavó una zanja en forma de “L” para obtener una pared vertical para iniciar el tallado a mano.

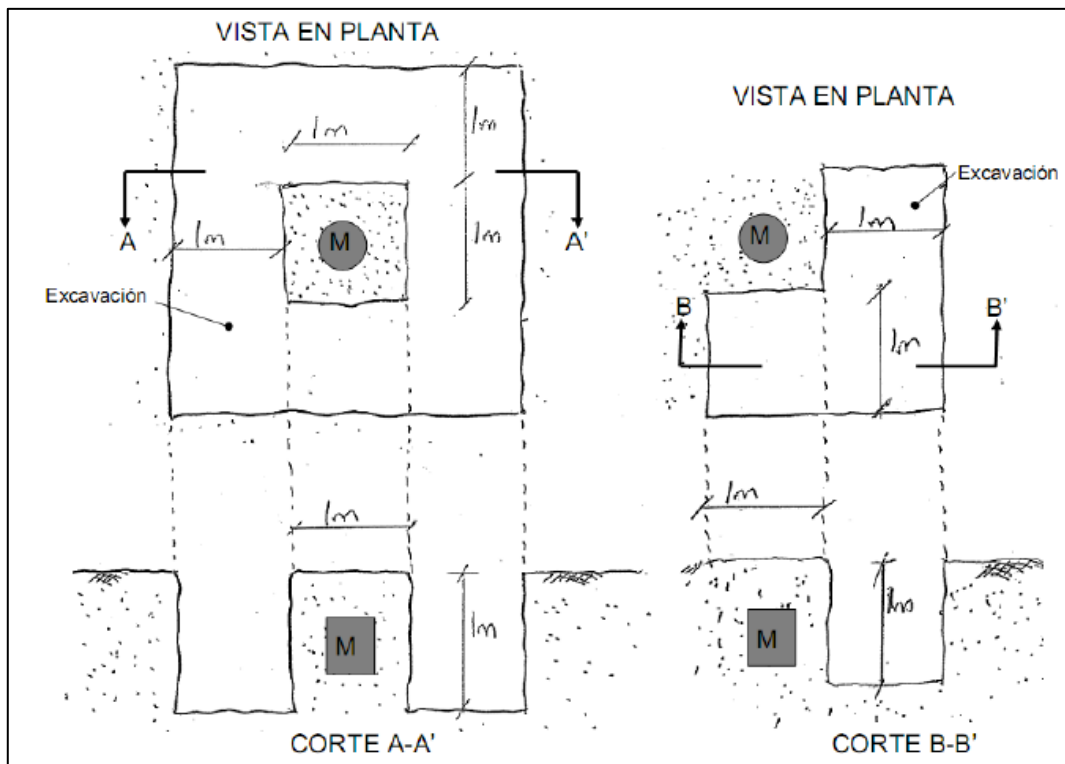


Fig.15 Sistema de corte de los bloques

- Tallado de la muestra

El tallado de las muestras fue realizado manualmente rebanando tajadas de suelo desde la periferia del bloque de 1m de lado hasta conseguir las medidas que se pueden observar actualmente en las muestras (38cm de Φ y altura de 30cm). Con el fin de obtener una muestra con el menor grado de alteración, la muestra tallada correspondería a la parte interior del cubo.

El procedimiento descrito Jubert Pineda en el artículo en que se basa este apartado, nos describe que se inicia la actuación con el tallado de un cubo de suelo de menor diámetro en la parte central. Posteriormente se retira la capa superior del bloque puesto que este material puede estar alterado por ser la más superficial, y a continuación se talla la muestra cilíndrica del suelo hasta alcanzar el diámetro y la altura requerida.



Fig.16 Realización de extracción del bloque donde: a) se separar del resto de material, b) se le empieza a dar la forma, c) se alisa, d) se obtiene la muestra.

- Recubrimiento y parafinado de la muestra

Después del tallado, la muestra fue recubierta para evitar posibles efectos de alterabilidad, como pérdidas de humedad y/o aislarlo de los cambios de temperatura. Primero el suelo se recubre con varias capas de papel de film en su parte exterior y posteriormente se recubre con varias capas de papel de aluminio.

La parafina líquida fue introducida entre la muestra y un tubo de PVC para confinar el suelo y aislarlo. En este caso la parafina se mezcló con porexpan por dos razones: disminuir el volumen de parafina y amortiguar la muestra contra golpes.



Fig.17 Protección de la muestra.

- Corte y parafinado de la base

Para evitar problemas de alteración, el corte de la base fue realizado usando una placa de acero cuadrada la cual estaba reforzada en su contorno para evitar el pandeo.

Posteriormente al realizar el corte, se retira de la excavación, llevándolo a una mesa donde aislar la muestra con parafina la parte inferior que aún se halla expuesta, y preparar la muestra para su transporte.

Para la mayoría de las muestras los técnicos buscaron un método que mejorara la velocidad de ejecución. En este nuevo sistema la placa de corte se empuja por medio de una barra de acero que a su vez es empujada por una maneta que gira a través de un tornillo sin fin.

Debido a la alta plasticidad de las muestras de la arcilla se colocan dos placas de acero sobre el tubo de PVC para aumentar la tensión vertical y evitar el movimiento de la muestra a medida que la placa de acero penetra. Este método de corte requiere de un sistema de reacción para el empuje de la placa. El sistema se compone de una placa de madera de 150mm de espesor que se halla fija al terreno por medio de dos barras de acero. El giro de la maneta provoca la salida del tubo de acero, que a su vez, empuja la placa de corte dentro del suelo.

Una vez finalizado el corte de la base, se colocan las placas superiores de PVC y de acero manteniendo la placa de corte en la base. Tanto en la tapa como en la base de la muestra se colocan dos placas de espuma para proteger la muestra contra golpes debidos a la manipulación de esta.

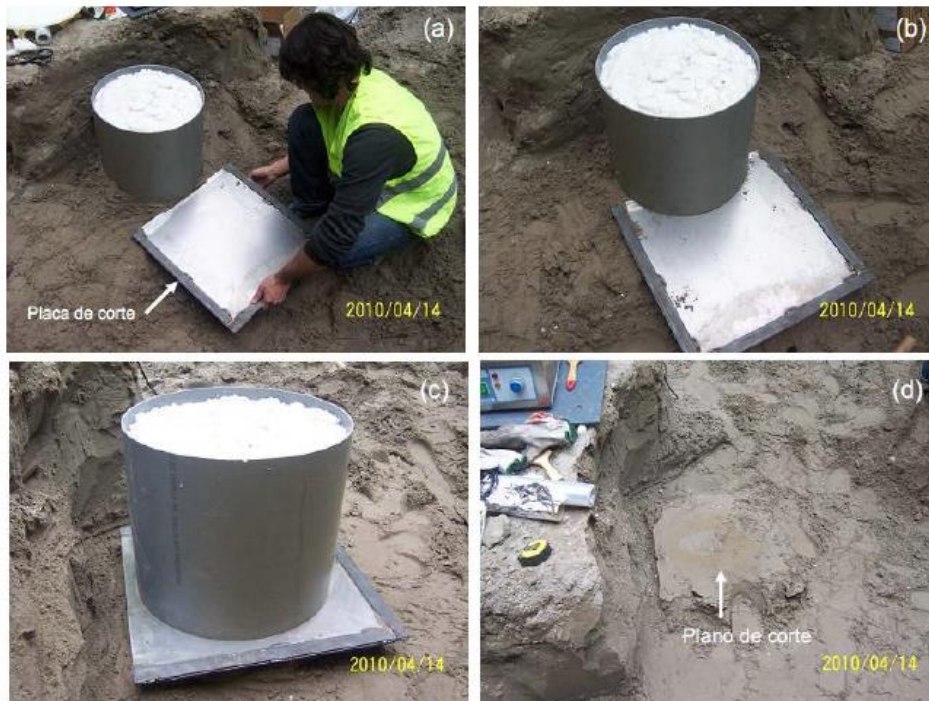


Fig.18 Extracción de la muestra técnica de la plancha de acero.

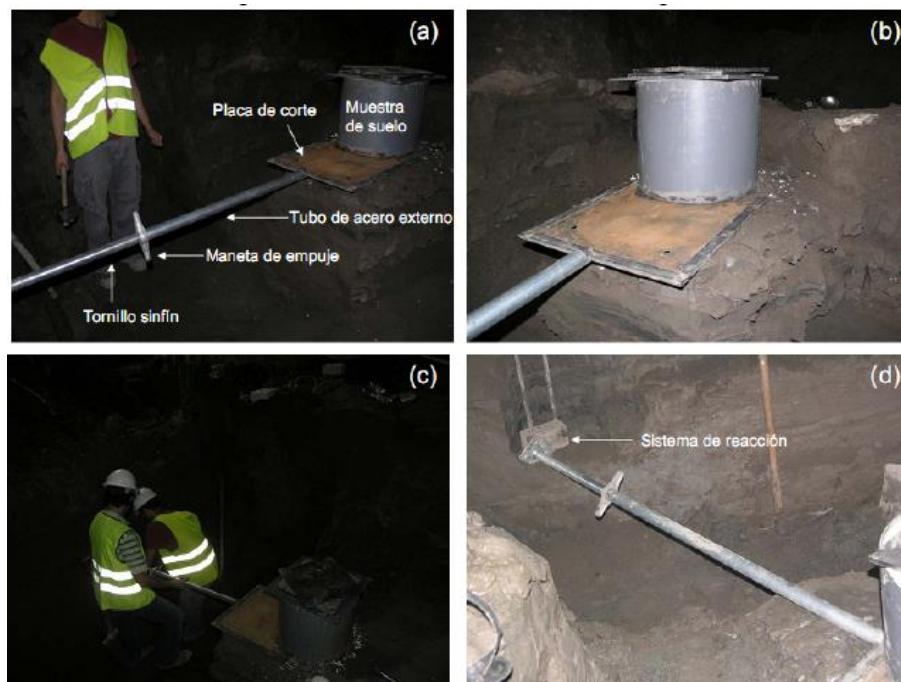


Fig.19 Extracción de la muestra técnica de la barra.

- Transporte y almacenamiento

Para prever la aparición de algún tipo de problemática durante el transporte y almacenamiento en el laboratorio, se colocaron placas de madera y una placa superior de espuma rígida. De esta forma se consigue que la muestra estuviera sobre la espuma y las barras de acero no estuvieran en contacto con el suelo.

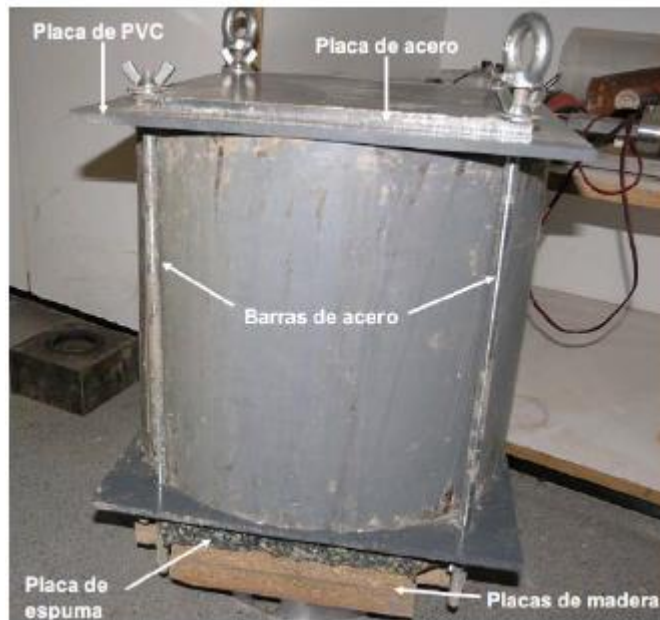


Fig.20 Muestra prepara para el transporte.

**ESTUDIO DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS DE
LABORATORIO**

Capítulo 3. Material utilizado para la investigación

3.1 Introducción

Como se han podido ver en anteriores apartados, se extrajeron un total de 7 muestras bloque inalteradas. Debido a la problemática con respecto a la caracterización de las arcillas y limos del delta del Llobregat, este trabajo se centra principalmente en dos muestras bloques que representan estos niveles-

En este apartado se narra la descripción de las muestras que serán ensayadas en el laboratorio, tanto en su ubicación como el método de cuarteo para preparar las muestras para los ensayos.

3.2 Origen de las muestras

Del conjunto de muestras que se procedieron a extraer por parte de la Universidad, se utilizaron para este estudio las muestras bloque 3 y 6. Ambas se hallaban en el sector 3, y por tanto, cerca del emplazamiento de:

- Un sondeo a rotación con recuperación continua de testigo (SC).
- Un ensayo CPTu (denominado E).
- Un ensayo DMT (denominado D).

El bloque 3 se hallaba a una profundidad de -7 a -8 metros (según m.s.l.a.), y como se observa ver en la siguiente figura esta se hallaría en las arenas de frente deltaico. El bloque 6, se hallaría a la profundidad de -13 a -13,5 metros (según m.s.l.a.), la cual correspondería a pertenecer al nivel de limos y arcillas de la cuña limosa intermedia, en especial a los materiales del nivel QL3-QL3m. Aunque, como se aprecia en la siguiente figura, no se puede determinar exactamente su posicionamiento, ya que dependiendo de la zona de la cuña, se podría ver que tenga arenas y arcilla, por hallarse en una zona intermedia de la cuña. Las profundidades de muestreo excluyen cualquier presencia de rellenos antrópicos.

3.3 Cuarteo de la muestra

Con el fin de obtener las muestras para realizar los diferentes ensayos de laboratorio, se procedió a dividir el bloque en sectores. Por tanto, el bloque fue distribuido para extraer un total de 5 fragmentos de la forma en que se muestra en la figura, y al tener una gran altura, el bloque fue dividido por la mitad, por tanto que de cada bloque extraeremos el doble de fragmentos para ensayar.

En la figura 21 se muestra las muestras que se extrajeron por bloque para los diferentes ensayos.

Ensayo	ID Muestra	
Edometro	Parte Superior	B-4Q-PS-E1
		B-4Q-PS-E2
		B-4Q-PS-E3
		B-4Q-PS-E4
	Parte Inferior	B-4Q-PI-E1
		B-4Q-PI-E2
		B-4Q-PI-E3
		B-4Q-PI-E4
Caracterizar	Parte Superior	B-1Q-PS-A
		B-1Q-PS-B
		B-1Q-PS-C
		B-1Q-PS-D
	Parte Inferior	B-1Q-PI-A
		B-1Q-PI-B
		B-1Q-PI-C
		B-1Q-PI-D
Corte directo	Parte Superior	B-2Q-PS-CD1
		B-2Q-PS-CD2
		B-2Q-PS-CD3
	Parte Inferior	B-2Q-PI-CD1
		B-2Q-PI-CD2
		B-2Q-PI-CD3

Fig.21 Ensayos a realizar en el laboratorio

- Procedimiento

Antes de proceder a realizar cualquier acción, se destinó una zona del laboratorio para realizar el cuarteo, donde estuviera aislada, y con un humidificador, que mantuviera el ambiente húmedo, de esa forma se evita la posible alteración del ambiente sobre la muestra, y la pérdida de agua de esta misma.

Después de haber hecho los preparativos, se procedió a utilizar una tabla, que permite cortar con precisión la muestra por la mitad, y posteriormente desplazar a una bandeja, para tener una mayor libertad de movimientos para hacer bien los cortes.



Fig.22 Esquema de división del bloque

La división del bloque por la mitad fue realizada con una plancha de hierro, debido a la alta plasticidad que mostraba el bloque 6.

A partir de una plantilla, se ha pintado sobre la muestra con spray para hacer los cortes precisos. Como se muestra en la figura 22, se cuarteó la muestra dividiéndola por cuartos, marcando un punto de inicio, y el hueco central es separado, para unos posibles ensayos especiales. El corte de los fragmentos se realizó con una sierra con hilo de piano, siendo su división como se muestra en la figura 23, donde la parte más exterior sería el segmento A, sucesivamente el resto de letras hasta llegar a la capa más interior que sería el segmento D.

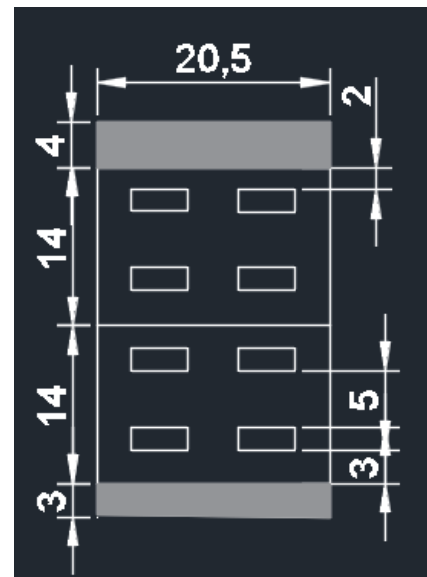
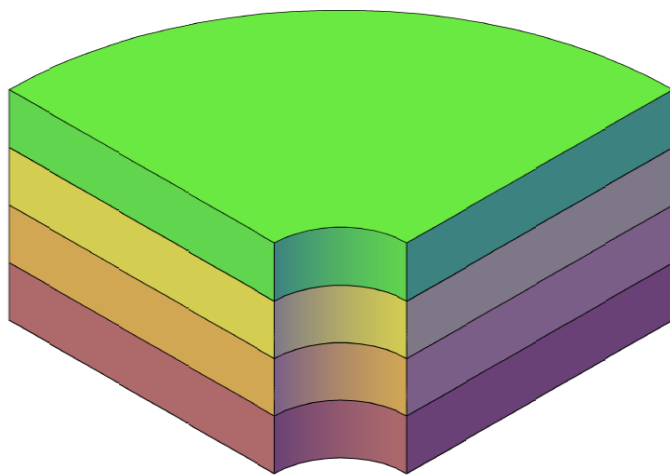


Fig.23 Distribución de las muestras para el edómetro (figura derecha) y para ensayos de caracterización (figura izquierda).



Fig.24 Muestra Bloque 6

Cada uno de los fragmentos en el momento en que se retiraron, rápidamente fueron envueltos con una capa de papel de aluminio, seguido de una capa de film, y cinta de embalar. Es marcado con su distintivo, y finalmente llevado de nuevo a la cámara húmeda para conseguir el tiempo mínimo de exposición.

A raíz de lo comentado anteriormente, se puede observar que varios fragmentos de las muestras inalteradas no se ensayaron, sino que se almacenaron en la cámara húmeda, para un posterior estudio más detallado en un futuro. La identificación de las muestras correspondería a las que se observan en la figura 25.

Muestras	ID Muestras
Bloque 6	B6-PS-3Q
	B6-PI-3Q
	B6-PS-C
	B6-PI-C
Bloque 3	B6-PS-3Q
	B6-PI-3Q
	B6-PS-C
	B6-PI-C

Fig. 25 Muestras guardadas

3.4 Resultados del procedimiento

Como se observan en las imágenes, el procedimiento realizado en el bloque 6, fue todo un éxito¹, donde se obtuvo:

- Dos fragmentos, para realizar ensayos de caracterización
- Dos fragmentos, de los cuales se extrajeron ocho muestras para hacer ensayos edométricos.
- Dos fragmentos, de donde se iban a extraer 6 muestras para realizar ensayos de corte directo.

Se observaron dificultades, tanto en la separación de la mitad del bloque, como en la fragmentación de la muestra, debido a la alta plasticidad que presentaba el material. En la realización del corte del bloque, se observó que en la parte inferior, presentaba un nivel de más de 5 cm de arenas, así que también se realizaron ensayos en este nivel. En la figura 25 se observa que muestras eran óptimas para ensayar.

¹ Referente a la figura 23

BLOQUE 6				
Ensayo	ID Muestra		Estado de la muestra	Muestras ensayadas
Edómetro	Parte superior	B-4Q-PS-E1	Optima	Ensayada
		B-4Q-PS-E2	Optima	Ensayada
		B-4Q-PS-E3	Optima	Ensayada
		B-4Q-PS-E4	Optima	Ensayo fallido
	Parte inferior	B-4Q-PI-E1	Optima	Ensayada
		B-4Q-PI-E2	Optima	Ensayo fallido
		B-4Q-PI-E3	Optima	Ensayada
		B-4Q-PI-E4	Optima	Ensayada
Caracterizar	Parte superior	B-1Q-PS-A	Optima	Ensayada
		B-1Q-PS-B	Optima	Alterado
		B-1Q-PS-C	Optima	Ensayada
		B-1Q-PS-D	Optima	Ensayada
	Parte inferior	B-1Q-PI-A	Optima	Ensayada
		B-1Q-PI-B	Optima	Ensayada
		B-1Q-PI-C	Optima	No fiable
		B-1Q-PI-D	Optima	No fiable
Corte directo	Parte superior	B-2Q-PS-CD1	Optima	Ensayada
		B-2Q-PS-CD2	Optima	Ensayada
		B-2Q-PS-CD3	Optima	Ensayada
	Parte inferior	B-2Q-PI-CD1	Optima	Ensayada
		B-2Q-PI-CD2	Optima	Guardado
		B-2Q-PI-CD3	Optima	Guardado

Fig. 26 Tabla sobre muestras preparadas del Bloque 6

También se extrajo un nivel del bloque 6, donde se observó al cuartear un nivel de arenas, al cual se le realizaron ciertos ensayos, aunque solo por investigar debido a que no presentaba una gran potencia. En la tabla se muestra los ensayos que se realizaron.

BLOQUE 6 (arenas)				
Ensayo	ID Muestra		Estado de la muestra	Muestras ensayadas
Caracterizar	Parte inferior	B6-1Q-PI-A1	Optima	Ensayada
		B-1Q-PI-A2	Optima	Ensayada
Corte Directo	Parte inferior	B6-2Q-PI-A-CD1	Optima	Ensayada

Fig. 27 Tabla sobre muestras preparadas del Bloque 6 parte de arena.

El cuarteo del Bloque 3 presentó cierta complejidad debido a que posiblemente había mayor presencia de arenas, mostrando frecuentes momentos de desmoronamiento al realizar los cortes. Se pudo obtener la parte inferior, y realizar con éxito la separación del bloque superior, aunque de manera irregular. En la tabla se pueden observar los ensayos que se realizaron, y como se observa, debido a la rotura del bloque, este presentó alteraciones, produciendo que se tuvieran que excluir ciertas muestras.

BLOQUE 3				
Ensayo	ID Muestra		Estado de la muestra	Muestras ensayadas
Caracterizar	Parte superior	B-1Q-PS-A	Optima	Ensayada
		B-1Q-PS-B	Optima	Alterado
		B-1Q-PS-C	Optima	No Ensayada
		B-1Q-PS-D	Optima	No Ensayada
	Parte inferior	B-1Q-PI-A	Optima	Ensayada
		B-1Q-PI-B	Alterado	Ensayada
		B-1Q-PI-C	Optima	Valores no fiables
		B-1Q-PI-D	Optima	Valores no fiables
Corte directo	Parte superior	B-2Q-PS-CD1	Optima	Ensayada
		B-2Q-PS-CD2	Optima	Valores erráticos
		B-2Q-PS-CD3	Alterada	No ensayada
	Parte inferior	B-2Q-PI-CD1	Optima	Guardado
		B-2Q-PI-CD2	Optima	Guardado
		B-2Q-PI-CD3	Optima	Guardado



Fig.25 Muestra Bloque 3 fragmentada

Por tanto, sería interesante hallar la forma de poder analizar las muestras de arenas cercanas a los niveles de limo-arcilla, para ver la interacción de estos dos niveles, pero para ello se debería hallar un método con lo que poder trabajar la arena sin alterar sus características naturales, para dar valores más precisos.

Capítulo 4. Descripción de equipos

4.1 Ensayos de Caracterización

Antes de realizar cualquier tipo de ensayo específico, se debe realizar una caracterización de las muestras, para luego especificar cada ensayo con la muestra que le corresponde.

Para este trabajo se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- Límites de Atterberg.
- Granulometría por sedimentación.
- Granulometría por tamizado.
- Peso específico.
- Humedad.

En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos en el laboratorio de los bloques 6 y 3, respectivamente, y las apreciaciones que de estas.

4.3 Ensayo de Corte Directo (CD)

4.3.1 Equipo

En este apartado se explica este ensayo, que tiene por objetivo la determinación de los parámetros resistentes, cohesión (c') y el ángulo de rozamiento interno (Φ'), de un suelo sometido a esfuerzo cortante.

Para determinar esos parámetros se utilizó un equipo de corte directo en donde en un ensayo predeterminado, una probeta de suelo de forma cilíndrica que se encuentra restringida lateralmente por una pared rígida, se corta a lo largo de un plano horizontal mientras se encuentra sometida a una presión normal a dicho plano. El ensayo se realizó en un equipo Wykeham Farrance WF 25300. Las características más importantes de dicho equipo son las siguientes:

- Caja de corte de 60mm de diámetro por 25 mm de altura.
- La carga vertical se aplica con un sistema de palancas siendo recomendable no superar los 500 kPa.
- La medida de desplazamiento vertical y horizontal se realiza mediante un LVDT con una resolución de $1\mu\text{m}$, conectado a un sistema de adquisición automática.
- El desplazamiento horizontal aplicado en la parte inferior de la muestra está controlado por un motor, que permite velocidades entre $1\mu\text{m}/\text{min}$ y $1,2\text{ mm}/\text{min}$.
- La fuerza tangencial se controla por una célula de carga de 1kN de capacidad, que se almacena en el archivo de resultados con una precisión de 0,1% FS.



Fig.29 Equipo Wykeham Farrance WF 25300

4.3.2 Metodología

El tipo de ensayo efectuado ha sido consolidado-drenado (CD), en el cual se aplica la tensión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación se procede a la rotura de la probeta a una velocidad lenta como para que no se originen presiones intersticiales, permitiendo el libre drenaje del agua de los poros. De este modo obtendremos los parámetros resistentes efectivos

El procedimiento experimental sigue los criterios establecidos en la norma ASTM D3080-90. Las fases típicas de los ensayos de corte fueron:

- Fase de saturación: La muestras se inunda bajo una tensión vertical de 53 kPa. El tiempo de duración es de 1 día.
- Fase de compresión vertical: La muestra se carga hasta la tensión vertical previa a la etapa de corte, siendo un 50%, 100% y un 150% correspondiente a la tensión “in situ” que era de 215 kPa. El periodo de consolidación es de 1 día.
- Fase de corte: La muestra se somete a un aumento progresivo de la tensión tangencial a una velocidad de desplazamiento horizontal constante de 0,048 mm/min.

4.4 Ensayo Edométrico

4.4.1 Equipo

Para obtener los parámetros de consolidación de la muestra, procedí a utilizar un equipo de ensayo edométrico, que pudiera aplicar el método CRS. Los ensayos edométricos con carga variable requieren el registro de la carga vertical sobre la muestra, el desplazamiento vertical y la presión intersticial en la base de la muestra. La adquisición de estas lecturas fueron hechas mediante la conexión de 4 unidades básicas que son: los transductores, un amplificador y una terminal analógica (el datalogger) y un PC. El amplificador registra la señal procedente de los transductores, la amplifica y la transmite a la terminal analógica. La comunicación entre el PC y la terminal analógica se realiza mediante un sistema basado en el WOS (Wokrstation Operation System).

El equipo utilizado para esta caso tiene la principal característica de utilizar un anillo edométrico delgado de acero ($\phi_{int}=50$ mm, $h=20$ mm, $t=1$ mm, correspondiendo a un rango de área del 8%) de donde se extrajo la muestra para el ensayo, directamente del bloque. En la parte final del anillo esta trabajado para acabar en un ángulo hacia el interior de 45° .

A parte de esto, la célula edométrica está conectada a dos reguladores hidráulicos de presión GDS, donde uno regula la presión en el pistón, encargado de aplicar presión al pistón, y el segundo se encarga de saturar y mantener la cámara saturada. La presión que puede mantener el GDS no puede superar los 1500 kPa, para no producir ningún deterioro en el aparato.

La célula tiene dos piedras porosas, en la parte superior e inferior de la muestra, y para tener el control automática de la deformación, en la parte superior se coloca el LVDT que estará conectado al PC, que será quien tome los datos del ensayo.

4.4.2 Metodología

El ensayo CRS. es un ensayo de consolidación con carga continua que consiste en aplicar una velocidad de deformación vertical constante sobre la probeta, pero la velocidad de carga no tiene por qué ser constante sino que se adapta para mantener $\partial\varepsilon/\partial t$ constante., donde impuse una presión de poro de 20 kPa.

El procedimiento usado para realizar el ensayo sigue el empleado en estudios anteriores sobre las muestras de Verge de Montserrat (Sau, 2013) que son las siguientes etapas:

1. Etapa de Saturación: se procede a aplicar una tensión vertical igual a $\sigma_{net}=24$ kPa, y una contrapresión a la muestra de $u_w=20$ kPa. Durante este proceso, la cara superior se mantiene una presión atmosférica. El flujo vertical se utilizó para inducir la saturación. Esta etapa duro aproximadamente 24h.
2. Etapa de carga: En esta fase, lo que se procede a hacer es cargar la muestra, de manera constante, teniendo un máximo de 1200 kPa. Pero este se realiza en rampa, donde la deformación aplicada es menor a 0,01%/min. El proceso dura hasta que la muestra llega a su punto máximo, no sobrepasando el máximo.
3. Etapa de descarga: la muestra es descargada por fases (tensión actual > 1000 kPa > 500 kPa > 100 kPa > 50 kPa) siendo un rango de descarga de 1 kPa/s hasta llegar al final del escalón en el que se halle. Después de que llegue al final de cada escalón de descarga se debe esperar 10 minutos.



Fig.30 Célula Edométrica con GDS

Capítulo 5. Resultados Experimentales

En este capítulo se centra principalmente en presentar los procesos que se realizaron en el laboratorio, y los resultados que se obtuvieron de dichos ensayos.

5.1 Caracterización

En este apartado se exponen los resultados obtenidos de los test de caracterización básica. Estos análisis incluyen:

- Distribución del tamaño del grano (INE 103101-1995).
- Determinación del peso específico de las partículas sólidas (UNE 103302-1994).
- Determinación del tamaño de grano a través de granulometría por sedimentación
- Determinación de los límites de Atteberg.

A través de los ensayos de caracterización comentados anteriormente, se aplicaran una serie de fórmulas para utilizar sus valores para obtener otros parámetros:

$$\rho_{ap} = \frac{W_{muestra}}{V_{muestra}} \quad e = \frac{Gs}{\rho_{seca}-1} \quad Sr = \frac{\left(\frac{H(\%)}{100}\right) \cdot Gs}{e}$$

$$\rho_{seca} = \frac{\rho_{ap}}{\left(1 + \left(\frac{H(\%)}{100}\right)\right)} \quad n = \frac{e}{1 + e}$$

Los datos resultantes se muestran en las tablas siguientes.

		BLOQUE 6						
		Parte Superior			Parte Inferior			
		SA	SC	SD	SA	SB	SC	SD
Humedad (%)		33,46	32,53	33,96	28,43	31,56	27,40	30,41
Densidad total (g/cm3)		1,95	1,91	1,93	1,90	1,93	2,15	2,22
Densidad seca (g/cm3)		1,46	1,44	1,44	1,48	1,47	1,69	1,70
Índice de poros		0,80	0,83	0,83	0,78	0,79	0,56	0,55
Porosidad		0,44	0,45	0,45	0,44	0,44	0,36	0,35
Grado de Saturación, Sr (%)		100	100	100	96	100	100	100
Límites de Atteberg	LL	33,74	*	*	31,02	38,42	31,04	*
	LP	19,02	*	*	19,91	20,99	16,62	*
	IP	14,72	*	*	11,11	17,43	14,42	*
Peso específico de las partículas solidas (g/cm3)		2,62	2,62	2,54	2,40	*	2,22	2,66

Fig.31 Tabla de características geotécnicas del Bloque 6.

		Bloque 3	
		Parte Superior	
		PA	PB
Humedad (%)		25,58	26,58
Densidad total (g/cm3)		2,16	2,15
Densidad seca (g/cm3)		1,72	1,70
Indice de poros		0,59	0,60
Porosidad		0,37	0,38
Grado de Saturación, Sr (%)		117	120
Límites de Atterberg (*)	LL	31,18(*)	86,09(*)
	LP	37,32(*)	37,32(*)
	IP	37,32(*)	48,77(*)
Peso específico de las partículas sólidas (g/cm3)		2,75	2,72

Fig.32 Tabla de características geotécnicas del Bloque 3.

Los valores que se hallan con (*) es debido a que presentan valores anormales, ya sea por error humano o alteración de la muestra, como ensayos que no se realizaron. Como se puede observar en la tabla, las muestras presentan un grado de saturación anómalo. Se pudo deducir que una de las causas de estos valores es debido a que la densidad aparente se halla alterada.

La siguiente tabla muestra los valores que tendrían estos fragmentos si presentaran un grado de saturación del 100, como nos indican otros informes (*Informe de Igeotest, Testing block samples from silty deposits*).

		Bloque 3	
		Parte Superior	
		PA	PB
Humedad (%)		25,58	26,58
Densidad total (g/cm3)		3,12	3,01
Densidad seca (g/cm3)		2,49	2,38
Indice de poros		0,70	0,72
Porosidad		0,41	0,42
Grado de Saturación, Sr (%)		100	100
Límites de Atterberg (*)	LL	31,18	86,09
	LP	37,32	37,32
	IP	NP	48,77
Peso específico de las partículas sólidas (g/cm3)		2,75	2,72

Fig.33 Tabla de características geotécnicas del Bloque 3 con Sr 100%.

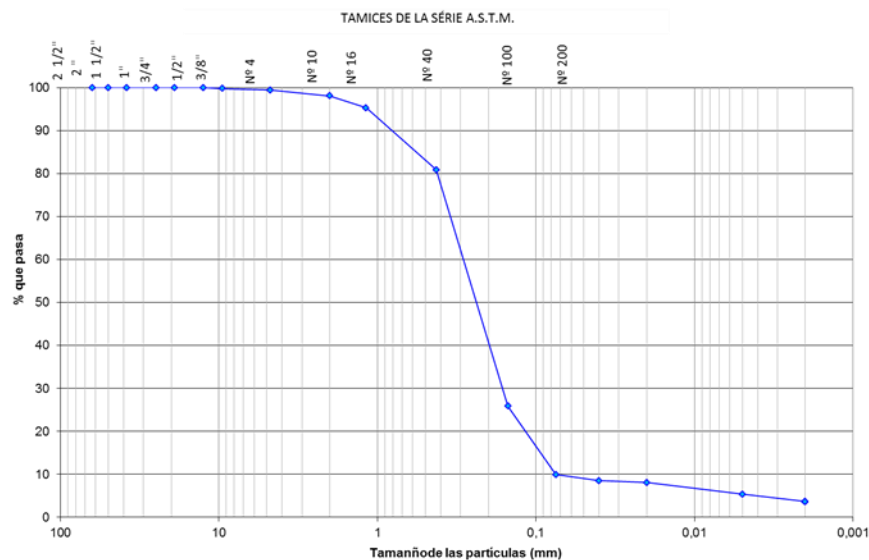
La siguiente tabla presenta la distribución granulométrica en las diferentes muestras de cada bloque, donde el rango de los materiales vendría definido por el tamaño de las partículas, siendo estas:

- Arenas: entre 1/16 a 2 mm.
- Limos: entre 1/16 a 1/256 mm.
- Arcillas: corresponde a valores inferiores a 1/256 mm.

Materiales	BLOQUE 6							BLOQUE 3	
	Parte Superior			Parte Inferior				Parte Superior	
	SA	SC	SD	SA	SB	SC	SD	PA	PB
Arenas (%)	0,11	1,92	0,06	0,98	1,90	1,71	15,53	2,57	0,86
Limos(%)	45,69	58,60	45,77	55,93	27,81	20,00	60,00	59,71	55,35
Arcilla (%)	54,20	39,48	54,17	43,09	70,29	78,29	24,47	37,72	43,79

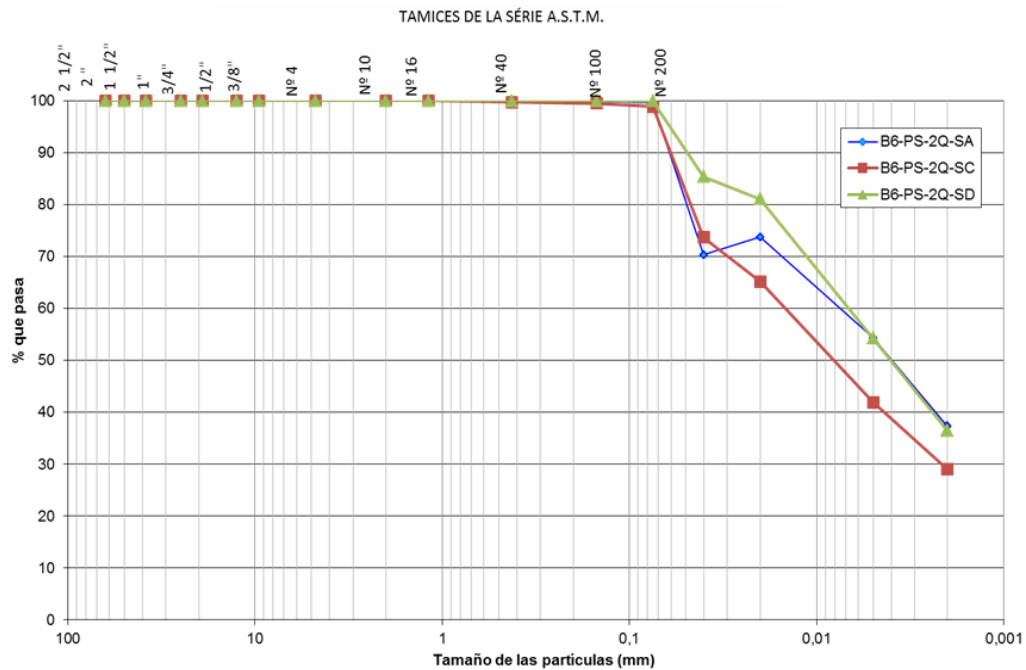
Fig.34 Tabla de características granulométricas de los bloques 3 y 6.

Distribución del tamaño de grano Bloque 3



Distribución del tamaño de grano Bloque 6

- Parte Superior



Con respecto a la parte inferior del Bloque 6, podemos observar que comparando con su parte superior, sucede todo lo contrario, pasa de ser un material granular limo-arcilloso, hasta tener una mayor proporción de arenas finas e intermedias, cosa que tiene sentido, en parte inferior se halla un nivel de arenas. Por tanto, en estos medios deltaicos se ha de hacer un estudio detallado del terreno, debido a la gran heterogeneidad de este, y al no presentar una cierta continuidad.

5.2 Resultados de los Ensayos Edométricos

- Parte superior del Bloque 6

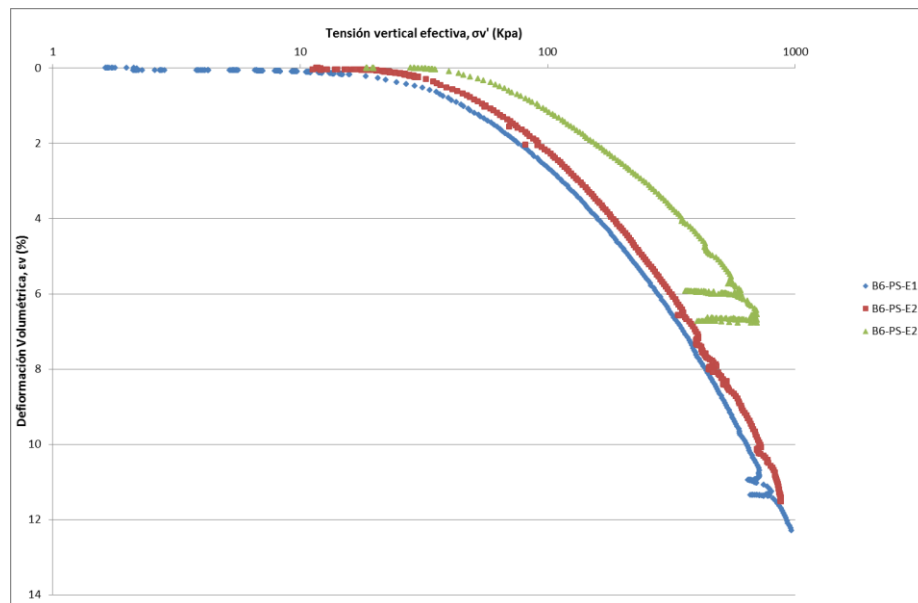


Fig. 38 Gráfica deformación volumétrica y tensión vertical en muestra B6-PS.

La figura 38 muestra la evolución de la deformación volumétrica en la parte superior del bloque 6, donde en las capas más en superficie, son más deformables que a niveles más inferiores, como se observa en E3, alcanzando un rango máximo de deformación volumétrica de entre 10 a 12%. A diferencia de E3, que es más rígido que los anteriores niveles, y aunque tiene un rango máximo de deformación volumétrica de entre 6 – 8%, pero soporta rango mayores de tensión.

Como se puede observar en la figura 39, la presión de poro inicialmente durante la etapa de carga por la disipación. Si uno observa la figura anterior, se puede ver que justo esta disminución sucede cuando la deformación es mínima, pero posteriormente comienza a haber un aumento hasta llegar a un pico, justo cuando hay un aumento de la deformación volumétrica, por tanto la relación entre ambos parámetros es directa.

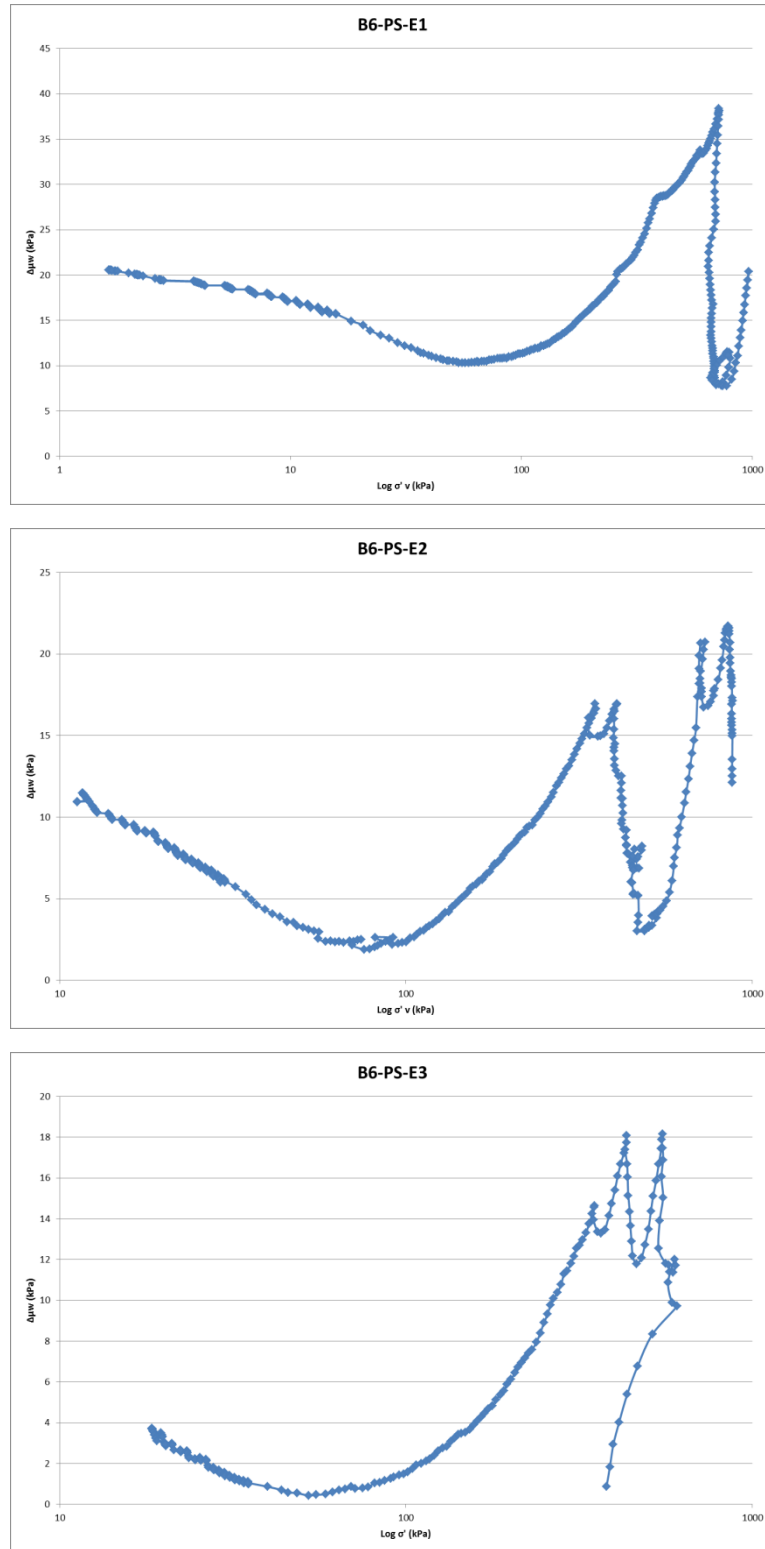


Fig. 39 Gráficas de índice de poros y tensión vertical en B6-PS.

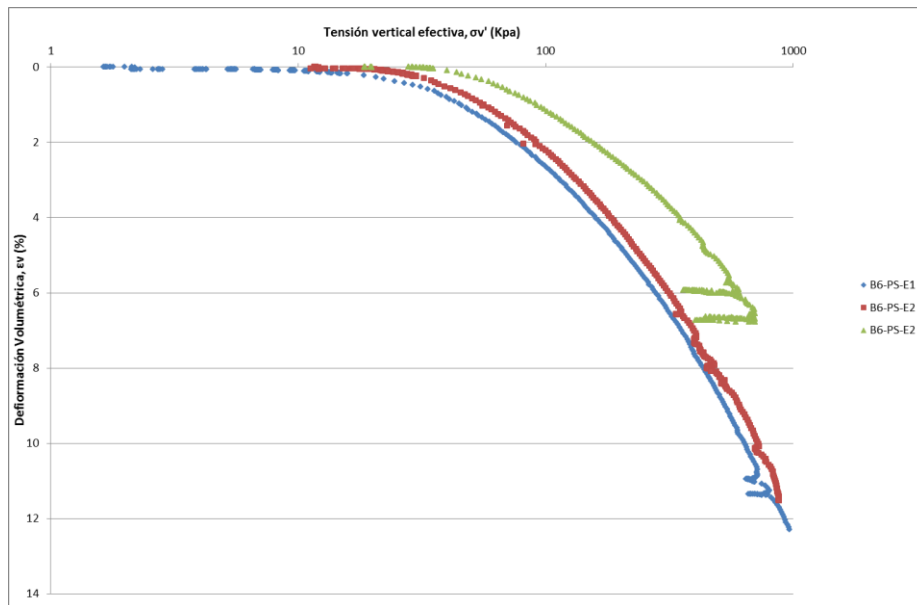


Fig. 40 Gráfica Índice de poros y tensión normal en las muestras de B6-PS.

En la figura 40, se observan las curvas del índice de poros con respecto a la tensión vertical efectiva que permiten obtener los valores del índice de compresión.

- Parte Inferior del Bloque 6

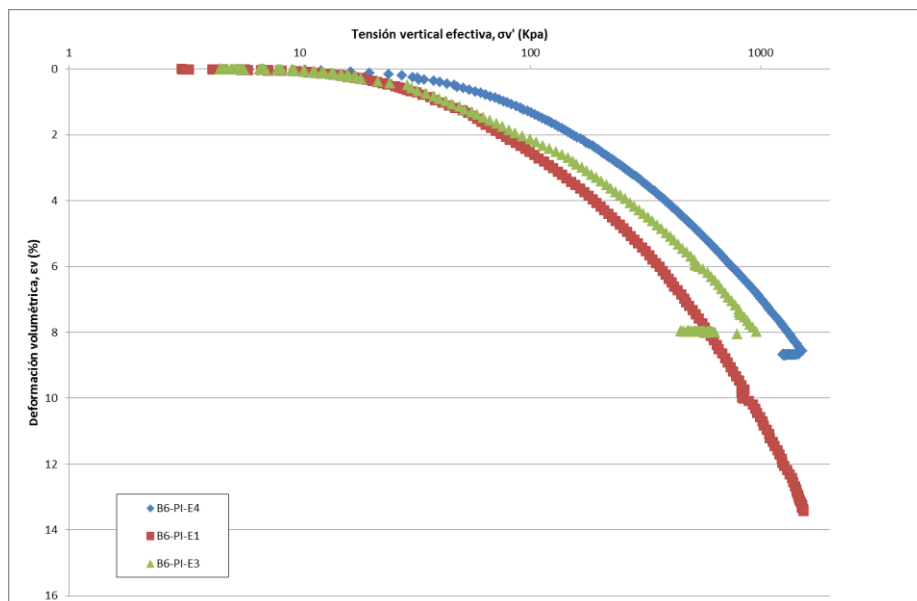


Fig. 41 Gráfica de la deformación volumétrica y tensión normal efectiva en las muestras de B6-PI.

A diferencia del caso anterior, a la figura 41 muestra que todas las curvas tienen la misma tendencia, salvo que hacia capas más interiores, estas presentan una menor deformación volumétrica. El grado máximo de deformación volumétrica para el ensayo E1 sería de 12 %, en cambio el resto sería de 8% ambas.

En la figura 41 se observa las curvas edométricas de la parte inferior. Si se comparan ambos gráficos, se puede ver la influencia del aumento de la proporción de arena, cosa que quedará reflejado en el C_c y el C_s .

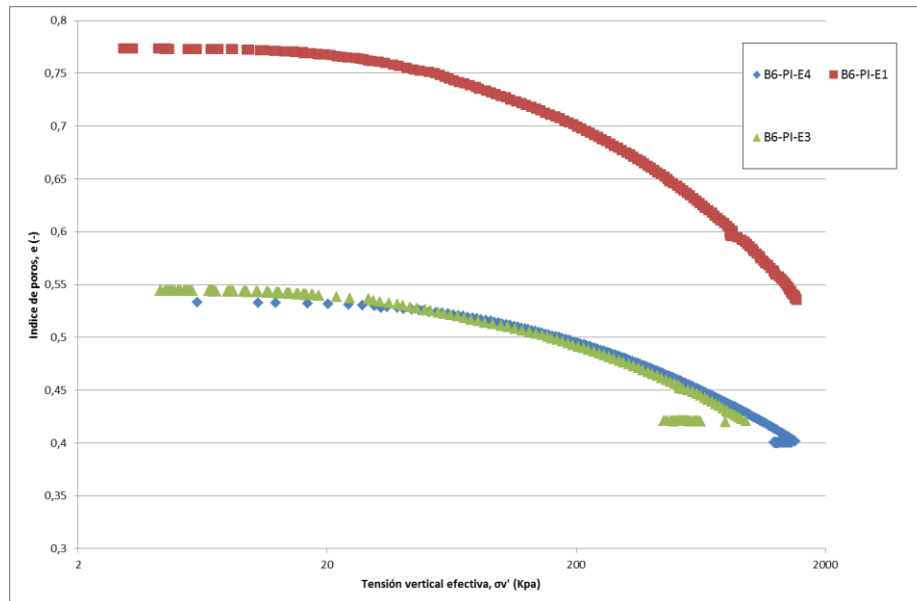


Fig. 42 Gráfica de Índice de poros y tensión normal efectiva en las muestras de B6-PI.

En esta figura se muestra la evolución de la presión del agua, donde se aprecia claramente lo comentado en la figura 41, aunque se puede ver como la influencia de las arenas provoca que vaya variando la recta, volviéndola más lineal

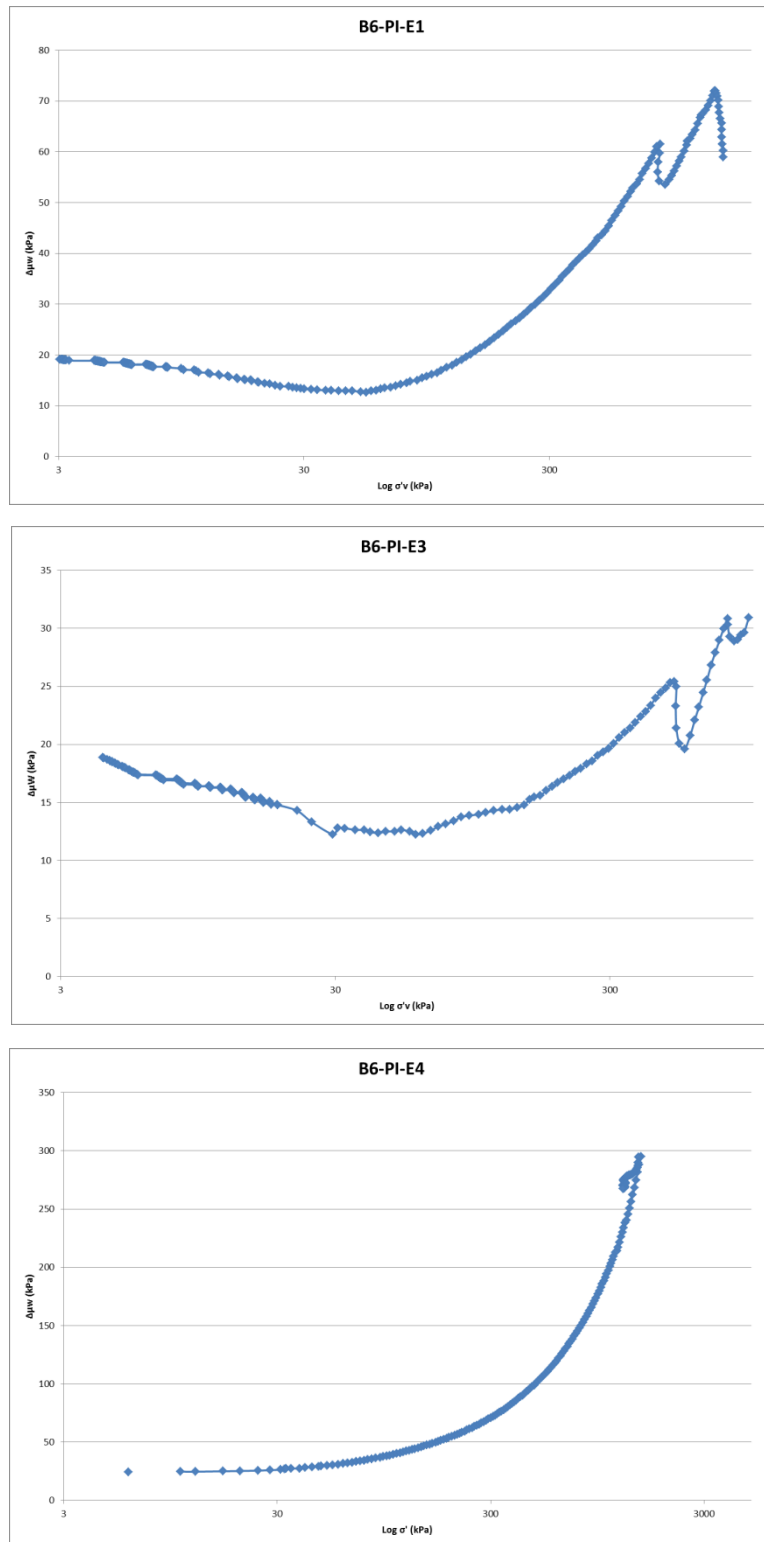


Fig. 42 Gráfica de presión de poro y tensión normal efectiva en las muestras de B6-PI.

5.2.1 Resumen

Después de exponer los gráficos explicando los resultados obtenidos de los ensayos, no se ha mostrado los resultados de los parámetros que obtendrían para los niveles que representan las muestras, para que de esa forma comparar los datos del laboratorio con los de campo.

Los datos que se obtuvieron en el laboratorio consistían en: el desplazamiento vertical, el volumen del GDS, la tensión total aplicada por el GDS, y la variación de la presión de poro. A raíz de estos datos, y parámetros iniciales, tales como relación de poro, humedad, densidad seca, entre otras se, pudo extraer el resto de parámetros a través de establecer diferentes relaciones entre ellos (σ'_v , e_0 , ϵ axial, etc.)

Posteriormente, para obtener los parámetros más específicos de la consolidación, se consideraban los resultados cada 25 intervalos de medida, obteniendo de los mismo el módulo edométrico, y, mediante el criterio de Wissa et al. el coeficiente de consolidación de las muestras, y a través de la relación de ambos, el parámetro de permeabilidad de la muestra.

Tanto el coeficiente de consolidación como la permeabilidad fueron calculados con la fórmula de Wissa et al. (1971) para interpretar ensayos CRS. Según estos autores, bajo una teoría utilizada de deformaciones infinitesimales, la velocidad de deformación óptima es aquella, en la cual, la relación u_v/σ es del 2 al 5%. El coeficiente de consolidación se define como:

$$C_v = \frac{h_0^2}{2u_w} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} \right)$$

donde h_0 es la altura inicial de la muestra, σ es la tensión total vertical, u_w es exceso de presión de poro en la cara no drenada, y la t es tiempo.

A través del informe geotécnico que se realizó, se obtuvo que las densidades húmedas de los diferentes niveles que se hallaban en el sector de la estación fueran:

- Para el nivel de Q13 tenía un valor de 16,67 kN/m³.
- Para los niveles Q12 y Q11 tenían un valor de 18,63 kN/m³.
- Para el nivel de suelo, se observó un valor de 16,67 kN/m³.

$$\sigma'_v = \sum \Delta\rho_{ap}z + \sum (\rho_{ap}z - \rho_wz) \quad \text{Los materiales en rojo serían los que se hallan por encima del nivel freático, y en lila, los materiales sumergidos.}$$

Con estos valores, y sabiendo el nivel freático (a 5,55 m) se ha podido estimar tensión vertical efectiva para el bloque 3, de 159,33 kPa, y del bloque 6, de 211,89 kPa. Según la estimación dada en el artículo donde se ensayó el bloque 7, se estimó una tensión “in situ” de 215 kPa, aunque si se procede a realizar su estimación de esta forma se observa que daría una tensión de 243 kPa.

La presión de preconsolidación se obtuvo, según la metodología propuesta, fue utilizar el método grafica de Casagrande (1936), que consiste en realizar al punto de máxima curvatura, realizaré una tangente a este punto. Con respecto a este tangente, realizaré otra recta, siendo horizontal al punto en cuestión.

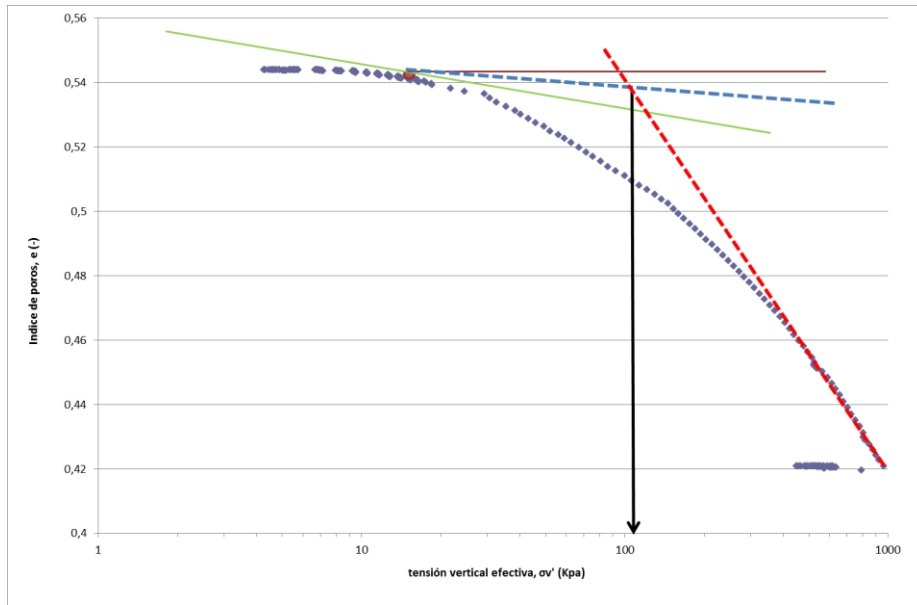


Fig. 44 Gráfica de obtención de la presión de consolidación con la muestra B6-4Q-PI-E3.

Entre esta horizontal, y la tangente al punto A, se traza una bisectriz, y posteriormente, se intersecta con una recta prolongada de la máxima pendiente de la recta del ensayo edométrico del laboratorio, y el lugar donde se cruzan, será el valor que al bajarlo al eje para hallar cuanto es la presión de preconsolidación. A través de esto, y sabiendo la tensión “in situ”, se obtiene el OCR de las muestras.

El valor de tensión efectiva correspondiente al punto de intersección de dicha bisectriz con la prolongación del tramo recto de la rama de carga de la curva edométrica es la presión de preconsolidación.

En la tabla se observa el coeficiente de hinchamiento característico, pero como se pueden ver en los gráficos, pocas muestras presenta una trayectoria de descarga. Es debido a esto que no se puede presentar dicho parámetro salvo en el caso de la muestra B6-4Q-PI-E3, donde se puede observar cierta descarga. A raíz de eso, se aplicará la siguiente fórmula para extraer los parámetros.

$$Cc = -\frac{e_a - e_b}{\log \frac{\sigma'_a}{\sigma'_b}}$$

$$Cs = -\frac{e_c - e_d}{\log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_d}}$$

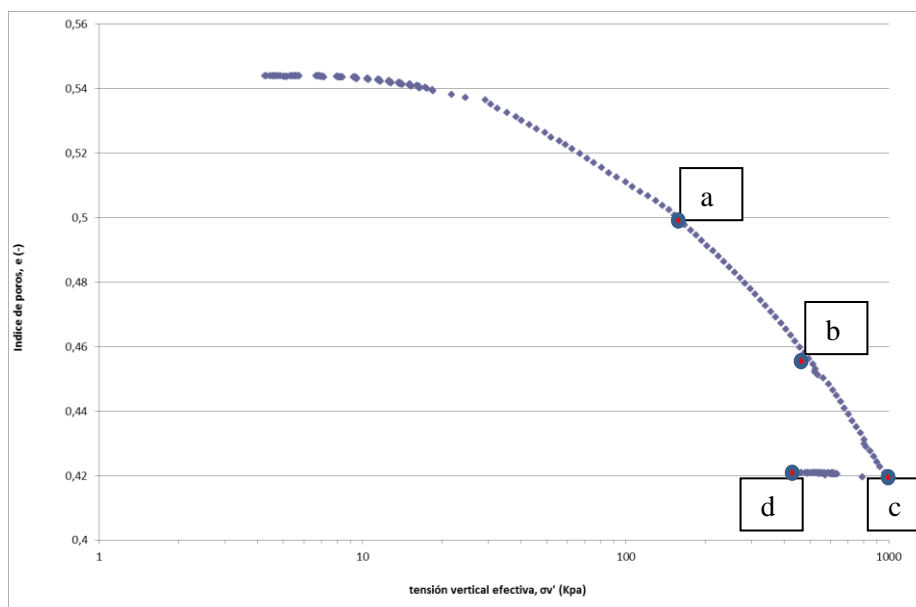


Fig.45 Gráfica de obtención de C_s y C_c .

En este caso el valor que se obtiene del coeficiente de hinchamiento sería de 0,020. Es a través de este método con los que se obtuvo los valores de C_c y λ .

A raíz de lo comentado anteriormente, la siguiente tabla presenta los parámetros que se obtuvieron de los ensayos edométricos. Viendo la tabla y comparándola con la tabla de parámetros de los ensayos “in situ” (figura 11). Como puede observarse viendo las tablas, se compararan los siguientes parámetros:

- Densidad total: para el nivel de la muestra que representaría QL2 sería de 1,7 según, los ensayos “in situ”. La tabla anterior nos indica que este parámetro tenía un valor de 0,02 superior al dado por los ensayos.
- Densidad seca: en este parámetro sucede lo mismo que el anterior, donde según los ensayos “in situ” tendría un valor de 1,65-1,7, y según los datos del ensayo sería de 1,45, difiriendo en 0,25.

Edómetro	Em (kPa)	Cc	λ	K (m/s)	Cv (cm ² /seg)	Densidad total (mg/m ³)	Densidad seca (mg/m ³)	Pc' (kPa)	σ_v "in situ"	OCR
B6-PS-1Q-E1	5462,14	0,13	0,06	1,32E-08	0,01	1,94	1,45	90,80	212,32	0,43
B6-PS-1Q-E2	5727,60	0,16	0,07	1,81E-08	0,01	1,93	1,46	91,70	212,32	0,43
B6-PS-1Q-E3	7624,20	0,09	0,04	1,12E-08	0,01	1,93	1,44	104,00	219,91	0,47
B6-PI-1Q-E1	7121,70	0,09	0,04	4,90E-09	0,00	1,94	1,45	150,00	220,12	0,68
B6-PI-1Q-E3	8019,34	0,06	0,03	2,21E-08	0,02	2,10	1,69	106,00	220,62	0,48
B6-PI-1Q-E4	9596,73	0,06	0,03	1,26E-09	0,00	2,11	1,70	104,00	220,62	0,47

Fig.46 Tabla de características geotécnicas extraídas del ensayo edométrico.

5.3 Resultados Ensayo de Corte Directo

5.3.1 Introducción

Como en el anterior apartado, se diferencian los resultados según las partes superior e inferior del bloque 6, y la parte superior del Bloque 3 que era la que mostraba unos resultados óptimos para su análisis, debido a fenómenos externos.

5.3.2 Resultados

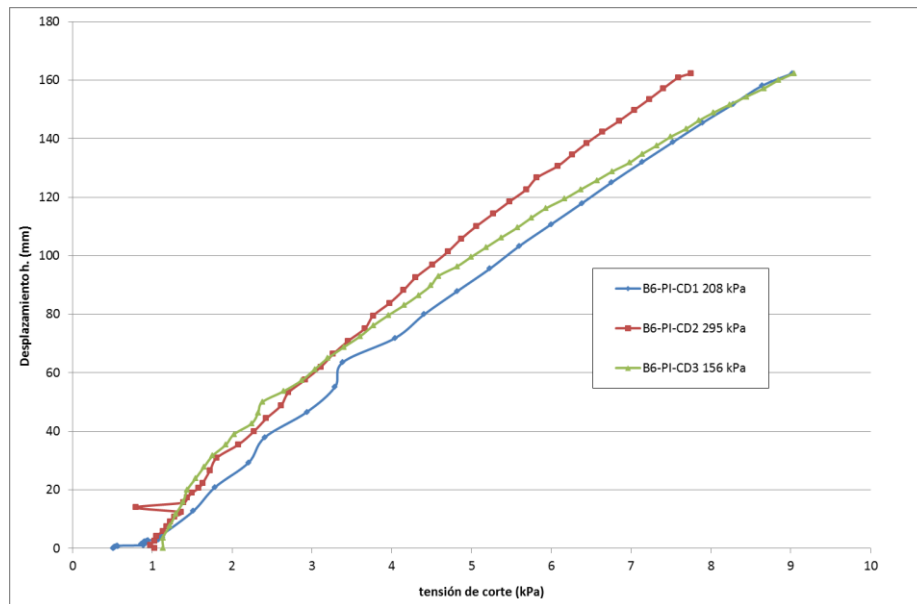


Fig.47 Gráfico de las Muestras B6-PI tensión de corte vs desplazamiento horizontal.

- Muestras del Bloque 6 Parte inferior

Como se puede observar en la figura 47, durante el ensayo, conforme se va aumentando la tensión de corte, aumenta de manera exponencial en todos los ensayos, exceptuando CD3 y CD1 coinciden en el valor de rotura de 162 kPa, pero con respecto al ensayo CD2, la tensión máxima es de 160 kPa, y solo hay un desplazamiento de 8mm, debido a que en el edificio hubo cortes de luz.

Como vemos en la figura 48, los ensayos presentan un comportamiento diferencial de ambos, donde en el primero se observa que al ir aumentando la tensión de corte, el desplazamiento horizontal aumenta, y el desplazamiento vertical disminuye, hasta llegar un punto en que se produce una primera rotura en la muestra, y comienza a aumentar el desplazamiento vertical, y aumentando de manera mínima la horizontal, hasta que en la muestra se produce rotura, y cede totalmente la muestra.

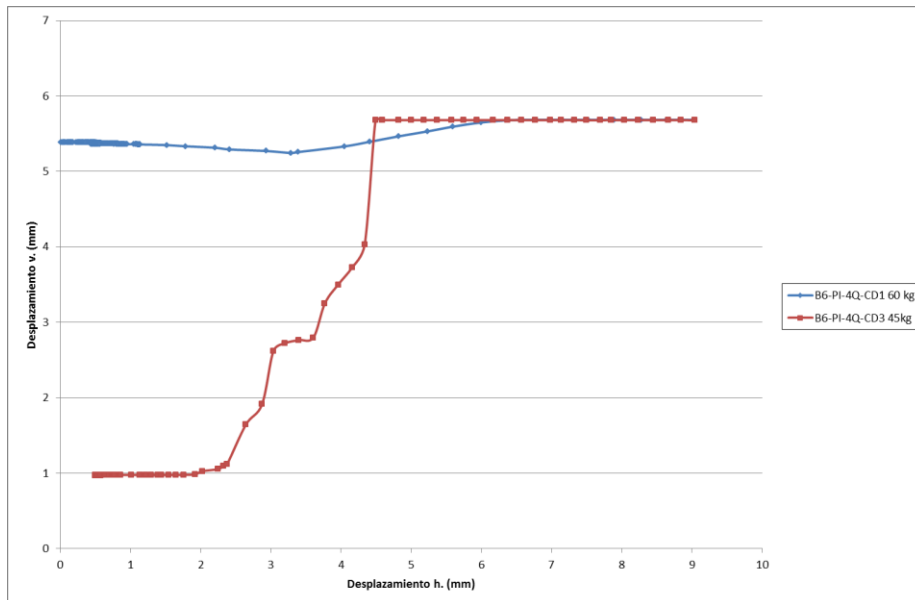


Fig. 48 Gráfica de las muestras B6-PS: desplazamiento vertical vs desplazamiento horizontal.

- Muestras del Bloque 6 parte superior

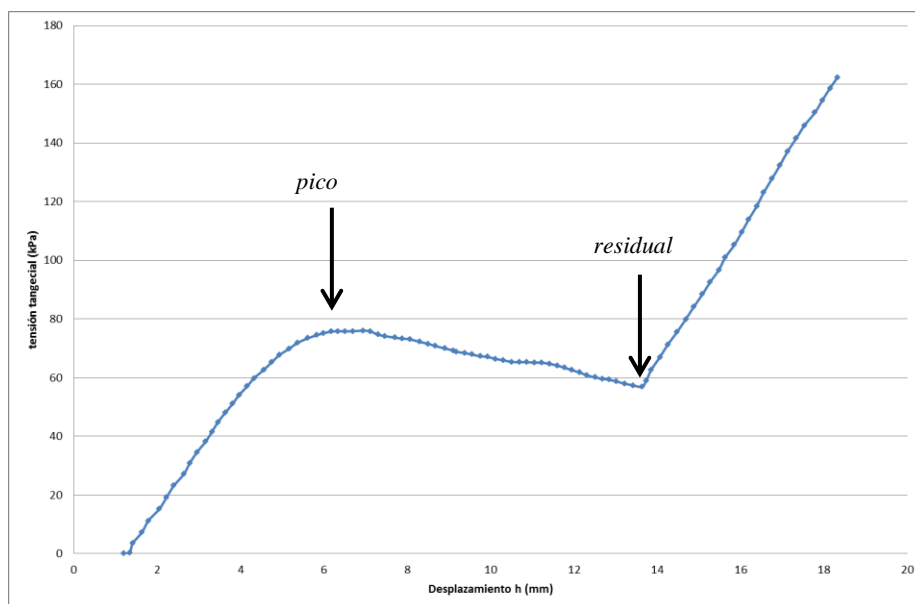


Fig.49 Gráfico de la Muestra B6-PS-4Q-CD1 (a 225 kPa) tensión de corte vs desplazamiento horizontal.

Como se aprecia en la figura 49, se puede observar claramente dos picos, uno cuando el desplazamiento llega a los 6,7 mm, y otro cuando llega a los 13,6 mm, después de este último punto, el equipo empieza a llegar a su límite, comenzando a dar valores anómalos. En estos dos puntos se puede calcular el ángulo de rozamiento movilizado pico, y el residual.

- Para ángulo de rozamiento movilizado pico: 18,59°
- Para ángulo de rozamiento movilizado residual: 14,16 °

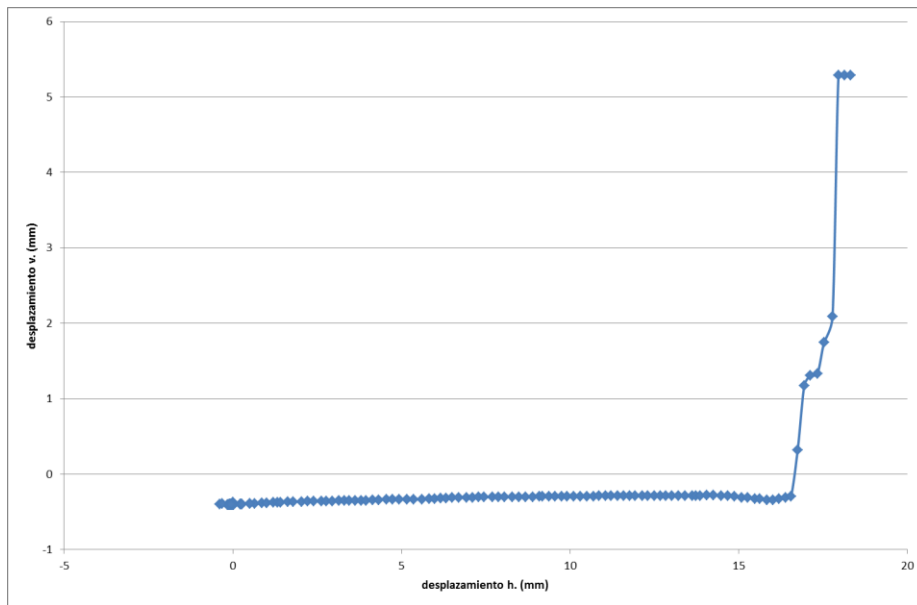


Fig.50 Gráfico de la Muestra B6-PS-4Q-Cd1(a 225 kPa) desplazamiento horizontal vs desplazamiento vertical.

Como se puede ver en el grafico la última subida es errónea, debido a que la maquina superó el desplazamiento dando valores erróneos en este último tramo.

- Arenas del bloque 6.

Se halló una capa de arena dentro del mismo bloque, y se procedió a estudiar las características que presentaba.

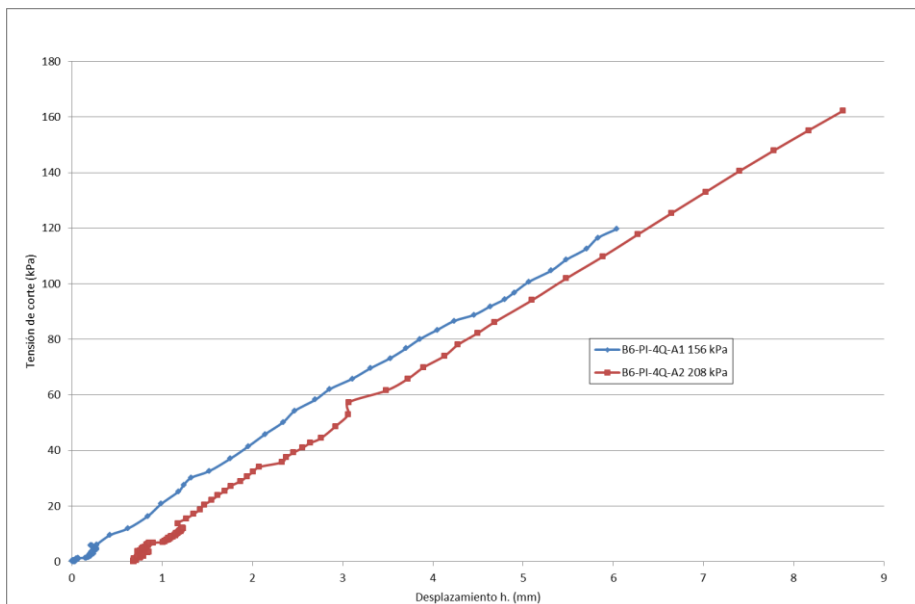


Fig.51 Gráfico de las Muestras B6-PI-A tensión de corte vs desplazamiento horizontal.

En la descripción de esta capa, se observa que conforme vamos a más profundidad del bloque 6, se observa que en los últimos niveles del bloque la proporción de arena aumenta, y como se observa en el gráfico, donde la sección con una mayor proporción de arenas su máxima tensión tangencial es de 119 kPa, en cambio en la parte más inferior donde vuelve tener una proporción de arcillas, el valor crítico vuelve a ser de 162 kPa, pero de nuevo no se consigue llegar a rotura, y solo se observa la tendencia de la recta.

En la figura 51, ambas pertenecen respectivamente a la parte superior e inferior de este sector arenoso. Ambas, como se puede observar, presentan el mismo comportamiento, donde progresa la tensión tangencial hasta llegar casi a 10 mm de desplazamiento.

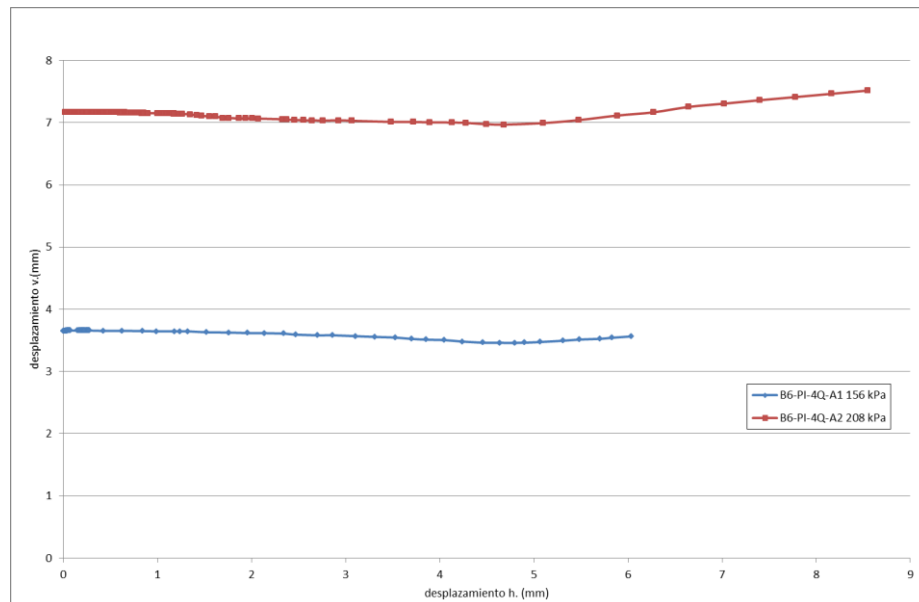


Fig.52 Gráfico de las Muestras B6-PI-A desplazamiento horizontal vs desplazamiento vertical.

Pero antes de ello, se observa que hay un pequeño hinchamiento de la muestra, hasta que esta resistencia cede, y vuelve a aumentar el desplazamiento vertical. La única diferencia de ambas es por la tensión vertical que tenían, siendo 156 kPa y 208 kPa respectivamente.

- Resumen del Bloque 6

Después de haber analizado los diferentes niveles que componen este bloque, he unido los diferentes ensayos para hallar la envolvente de rotura, según Mohr-Coulomb. Se extraería de realizar en una gráfica tensión tangencial y tensión vertical, e introducir de cada muestra la tensión máxima a la que se produjo la rotura. Pero debido a los errores producidos por llegar al límite máximo de la máquina, y que no llegaran a rotura los materiales, solo se exponen los datos siguientes para tener alguna referencia, o ver como se extraen los parámetros.

A raíz de hacer esto, se busca una línea de tendencia lineal entre los puntos, y dando una ecuación de una recta, siendo este caso:

$$y = 0,1676x + 120,29$$

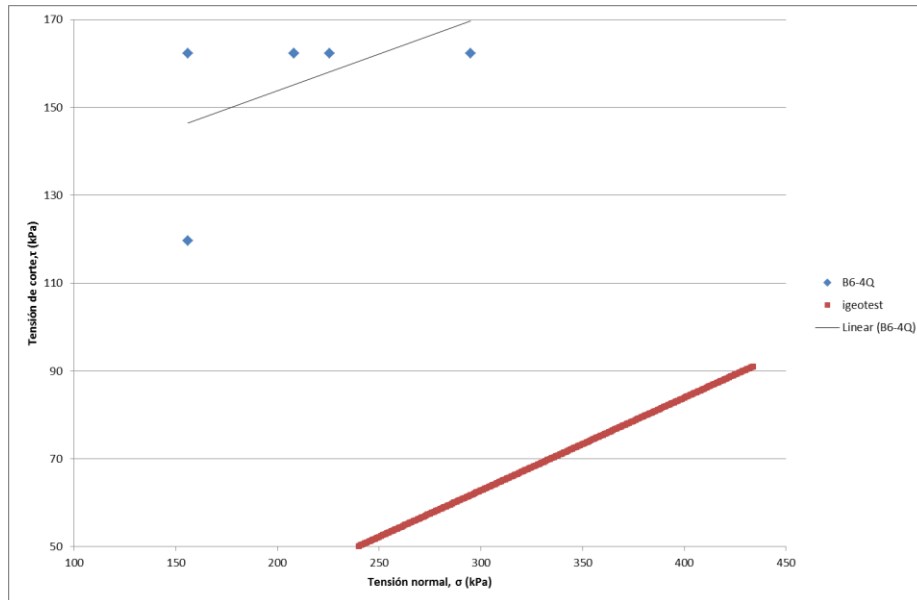


Fig.53 Gráfica para mostrar la envolvente de rotura.

En este caso, la envolvente no sería real, debido a que la mayoría de los materiales no se han hallado en rotura. La otra línea correspondería a la envolvente, dibujada a través de los parámetros de resistencia, extraídos de otro artículo (*Informe Geotécnico de Igeotest*), donde daba:

- c' : 0,58
- φ' : 15,50°

A través de hallar los datos de los ensayos de corte directo fuera del rango de la envolvente de rotura, se confirma que los valores no son fiables.

- Bloque 3

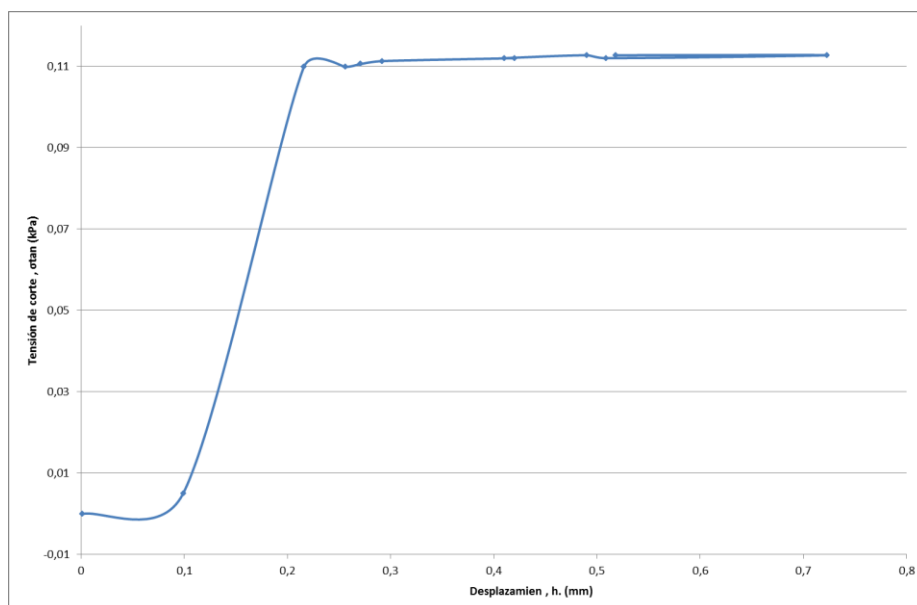


Fig.54 Gráfico de la Muestra B3 tensión de corte y desplazamiento horizontal.

Aunque no se pudo extraer gran información de este bloque se procedió a realizarles un ensayo de corte directo para estimar los parámetros de este material. Aunque se produjeron problemas técnicos con la maquinaria, provocando que no se pudieran extraer información sobre el bloque.

Pero a través de los datos obtenidos, o que se observaron, estos bloques también presentarían cierto interés de estudio, debido a que no son arenas del todo, sino una buena parte de arcilla que lo otorga características a estudiar.

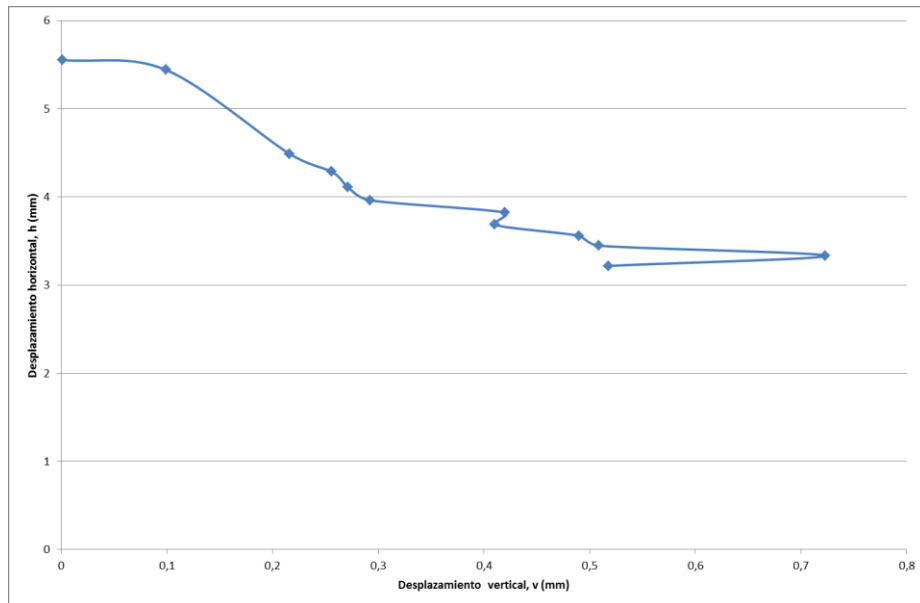


Fig.55 Gráfico de la Muestra B3 desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical.

**ESTUDIO DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS “IN
SITU”**

Capítulo 6. Análisis de los datos de los ensayos CPTu

A través de los capítulos anteriores, se ha ido argumentando sobre la dificultad que alberga la caracterización geotécnica de los materiales que se hallan en el delta del Llobregat, debido a la variación litológica que presentan, en particular a profundidades donde se van intercalando varias facies deltaicas.

En este capítulo se hace una consideración sistemática de los datos obtenidos en los ensayos de campo (CPTu y DMT) realizados en el emplazamiento de Verge de Montserrat, sobre aspectos tales como la estratigrafía, el grado de sobreconsolidación (OCR) y el módulo de deformación que permitan una comparación con la información obtenida mediante sondeos y/o ensayos de laboratorio.

6.1 Introducción

Los ensayos CPTu realizados en Verge de Montserrat fueron llevados a cabo por la empresa Igeotest, quien siguió el procedimiento normalizado A.S.T.M. D-5778-95 En el apartado 2.2.3 se recoge una copia de las partes de ensayo. Las medidas que se toman durante el ensayo (con espaciamiento 1 cm) son

- Resistencia del cono (q_c).
- Rozamiento local específico (f_s).
- Inclinación ($^\circ$).
- Presión intersticial dinámica (u).

En el CPTu empleado, la posición del registro de presiones de poros es la conocida como U_2 , es decir, con la piedra porosa situada inmediatamente detrás de la punta de cono.

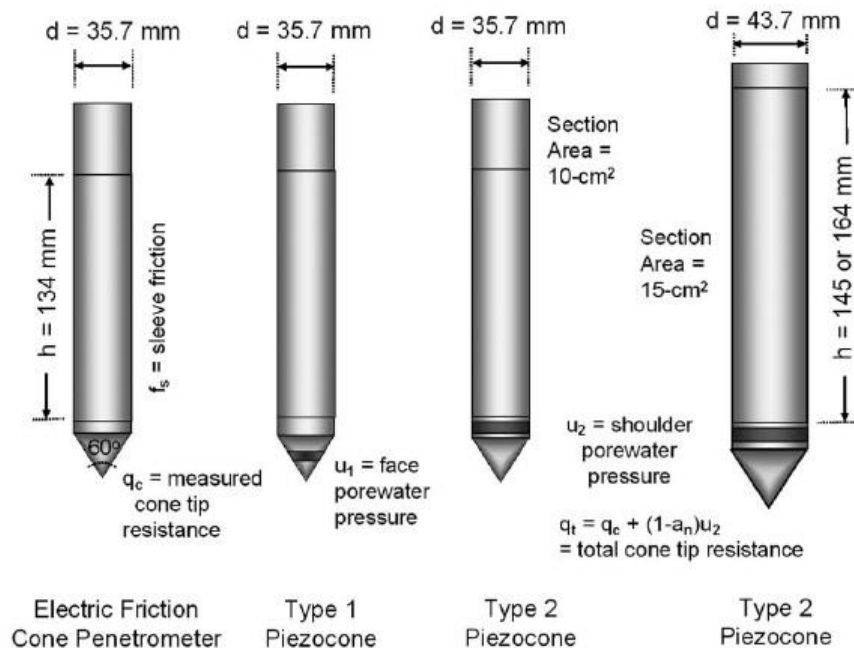


Fig. 56 Posiciones de la piedra porosa en los ensayos de CPTu.

Para la interpretación posterior de estas medidas, es necesaria una información auxiliar, a saber:

- Presión Interticial (U_0).
- Tensión efectiva vertical in situ (σ_{v0}).

Durante la penetración bajo el nivel freático, la presión intersticial actúa en la superficie de la punta y también en los extremos del manguito. Esto hace que la resistencia a la punta q_c , y el rozamiento lateral del manguito f_s , medidos no representen exactamente la resistencia total del suelo. Debido a esto, se realiza una corrección (*Robertson, 2015*) para obtener la resistencia a la punta corregida q_t :

$$q_t = q_c + (1 - \sigma'_{v0}) \times u$$

donde,

q_c : resistencia a la punta.

σ'_{v0} : tensión vertical inicial.

u : medida presión de poro.

Es ventajoso y habitual (*Robertson, 2015*) normalizar los parámetros f_s y q_t , por ello se utilizan frecuentemente los parámetros Q_t y F_r :

$$F_r = f_t/q_t \times 100$$

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma'_{v0})}{\sigma'_{v0}}$$

En cuanto a la presión de poro la normalización parte de la presión de poro en exceso sobre la hidrostática.

$$\Delta U = U - U_0$$

$$DPPR = \Delta U/q_T$$

A partir de estos parámetros normalizados básicos, se pueden derivar parámetros secundarios necesarios para realizar las interpretaciones correspondientes.

6.2 Análisis estratigráfico

6.2.1 Introducción

Como se ha comentado en anteriores apartados, una aplicación frecuente del CPT/CPTu consiste en la delineación o clasificación estratigráfica. Esta clasificación, como es natural, se basa en las medidas obtenidas con el instrumento y refleja las características mecánicas del suelo que afecta a dichas medidas, es así más bien una clasificación del tipo de comportamiento del suelo frente a la prueba CPTu (*soil behavior type, SBT*).

Afortunadamente, aspectos básicos de la clasificación clásica de los suelos, como son la distribución de tamaño de grano y la plasticidad, se suelen relacionar razonablemente bien con la respuesta del suelo al ensayo "in situ" y por tanto, hay buena concordancia general entre la clasificación habitual (p.e. USCS) y el SBT basado en CPTu.

Sin embargo, esto debe verificarse en cada caso, sobre todo en los materiales mixtos, donde, dependiendo de la proporción de material, y las características de este, puede dar una clasificación diferente. Por ejemplo, un suelo con 60% de arenas y 40% finos debería ser clasificado como "arena limosa" o "arena arcillosa" usando la clasificación USCS.

Pero, si los finos tienen un alto contenido de arcillas con alta plasticidad, el comportamiento del suelo sería más controlado por la arcilla, y la clasificación SBT (basado en CPT) reflejaría este comportamiento, y predeciría un comportamiento similar a las arcillas, tales como “limos mixtos”.

En el modo de exponerse los datos podría realizarse a través de datos no normalizados y normalizados.

- Gráficos no normalizado.

Este modo de representar los datos ha sido el más clásico de presentar los datos de CPTU, donde el más común fue expuesto por Robertson et al (1986), donde utiliza los parámetros que se extraen de este tipo de ensayo (q_c y f_s). El gráfico es global y puede proporcionar unas predicciones razonables del comportamiento del suelo (SBT) para sondeos CPT, superiores a 20m. Este tipo de gráfico puede sufrir superposiciones en algunas zonas, y deben ser contrastadas por artículos de experiencia local.

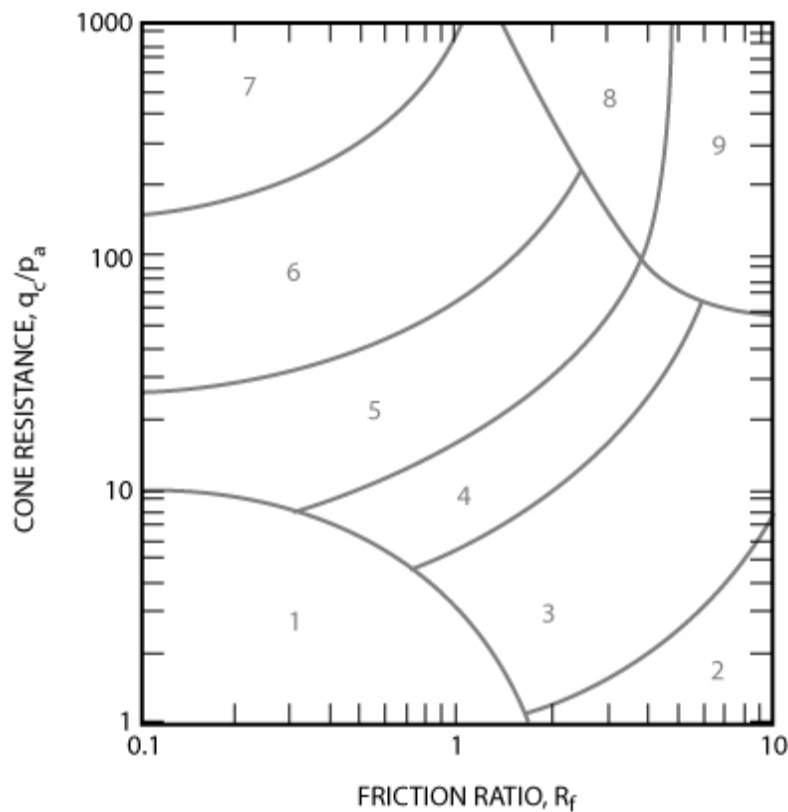


Fig. 57 Gráfico no normalizado SBT (Robertson 2010)

Zona	Tipo de comportamiento del suelo
1	Sensible, de grano fino
2	Suelos orgánicos-arcillas
3	Arcilla - Arcilla limosa para arcilla
4	Limos mixtos- Limo arcilloso para arcilla limosa
5	Arenas mixtas- arenas limosas para limos arenosos
6	Arenas - arenas puras para arenas limosas
7	Arena gravosa para arenas densas
8	Arena muy rígida para arena arcillosa
9	Grano muy fino rígido

Fig. 58 Tabla de la clasificación SBT no normalizado

- Gráficos normalizados

Debido a que, tanto la resistencia a la penetración como el aumento del rozamiento local con la profundidad, crecen con la tensión efectiva, los datos del CPT requieren una normalización de esa sobrecarga.

Uno de los gráficos más conocidos fue el propuesto por Robertson (1990), mostrado en la figura siguiente, donde las zonas son identificadas a través de los resultados del CPT, con respecto a los parámetros normalizados, como el Q_t y el F_r , donde se trazaron para suelos jóvenes, no cementados, insensibles y normalmente consolidados.

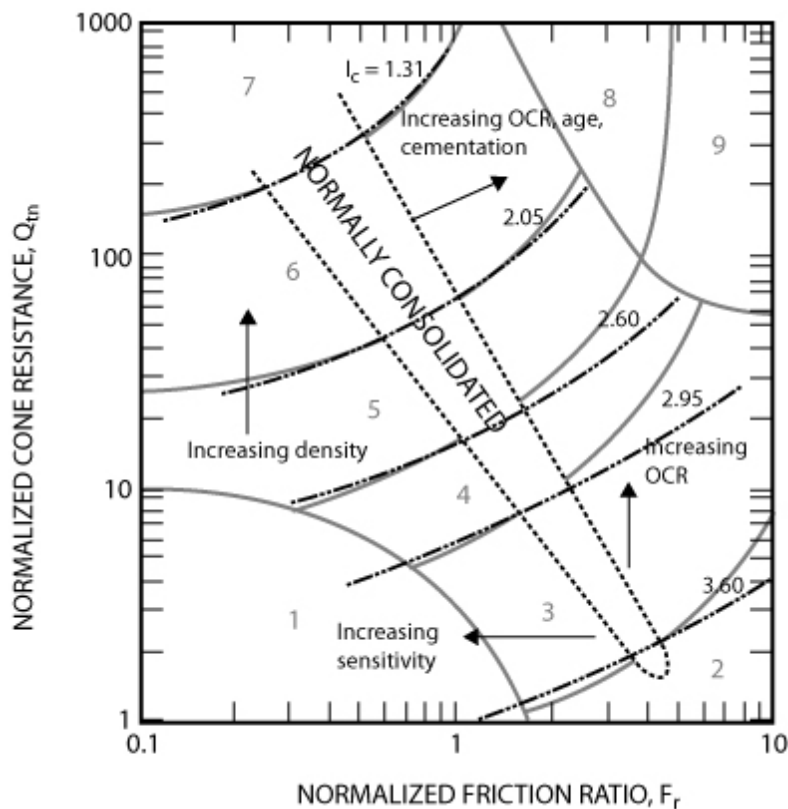


Fig. 59 Gráfico no normalizado SBT (Robertson 2010)

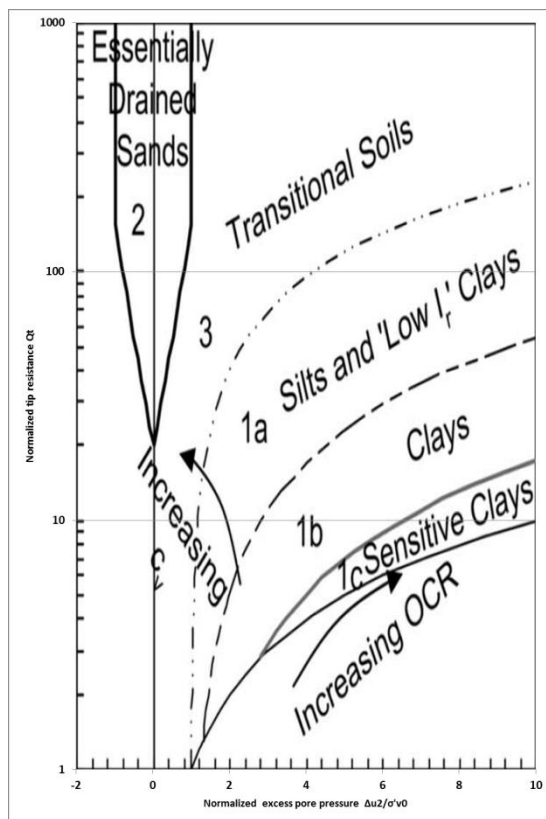
Este gráfico identifica las tendencias generales de la respuesta del suelo con respecto a:

- Densidad
- OCR
- Edad
- Cimentación por arenas
- Sensibilidad del suelo.

Pero todo ello deberá ser comparado con la experiencia de trabajos locales debido a la superposición de las zonas.

- Clasificación de Schneider

Método basado en resultados de diferentes pruebas de penetración, donde se definen los suelos de comportamiento transicional, es decir, limos, suelos residuales, arcillas altamente sobreconsolidadas, mezclas de suelos sensitivos o residuales, es decir, suelos que no se comportan necesariamente como no drenados (arcillas) o drenados (arenas).



Zona	Tipo de suelo
1a	Limos y arcillas de bajo I_p
1b	Arcillas
1c	Arcillas sensitivas
2	Esencialmente arenas drenadas
3	Suelos en transición

Fig. 60 Gráfico y tabla de la clasificación CPT de Schneider et al (2008) basado en $(\Delta U/\sigma'_{v0})$ con contorno de B_q y OCR.

6.2.2 Datos disponibles

Se emplean los resultados de los CPTu 1 y CPTu 2. La cota de boca de estos ensayos es la cota 5,5 msnsm.

Para tener una primera estimación sobre la distribución de los estratos, se puede observar los gráficos, tanto del esfuerzo por punta (q_c) como la presión de poro (u_2), para ver los estratos de materiales granulares y los materiales cohesivos, donde para el q_c es alto y el u_2 será bajo cuando se halla en arenas, mientras que en las arcillas es a la inversa.

Como se puede ver en las siguientes figuras, se puede apreciar la complejidad estratigráfica del emplazamiento, ya que hay un gran número de intercalación de niveles cohesivos con granulares. Pero a través de los gráficos de presión de poro, se observa como en el sector del CPTu 1, los primeros 15 metros hay una mayor proporción de materiales granulares, donde a partir de este sector comienza las intercalaciones de los materiales comentados anteriormente.

A diferencia de este ensayo, en el CPTu 2, hasta los 10 metros predomina el material granular, con ciertas intercalaciones de materiales cohesivos, pero a partir de ese punto empiezan los niveles de las intercalaciones.

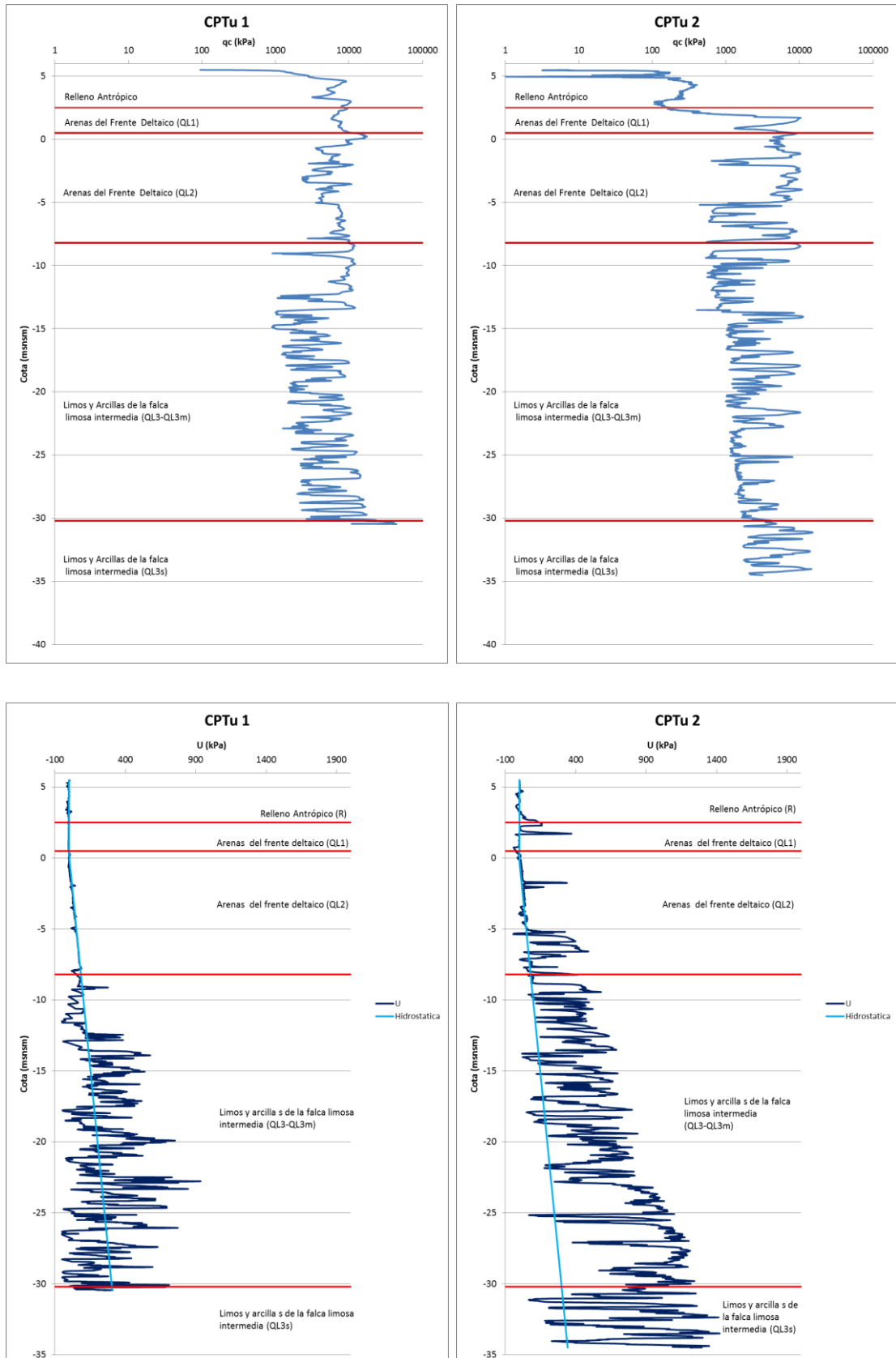


Fig. 61 Gráficos de la representación de q_c y U respecto la cota.

6.2.3 Aplicación de la clasificación de Robertson

A partir de los resultados del ensayo de piezocono, se han obtenido los gráficos Q_t - F_r donde separado los datos provenientes de los diferentes niveles estratigráficos preestablecidos en el proyecto.

Para obtener el SBT_n a partir de los datos de CPT, debe tenerse en cuenta que los parámetros de cono normalizados (Q_t y F_r) pueden combinarse con el Índice del tipo del suelo, a través del índice de comportamiento (I_c). Este vendría definido por:

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5}$$

Los contornos del I_c puede ser usado para aproximar a los de las categorías de SBT en el plano Q_t - F_r , dónde, aparecen como círculos concéntricos. Jefferies and Davies (1993) sugirieron que el índice I_c también se podría utilizar para modificar correlaciones empíricas que varían con el tipo de suelo.

La siguiente tabla de valores muestra el rango de valores de I_c para correlacionarlo con el método de clasificación de Robertson.

Zona	Tipo de comportamiento del suelo	I_c
1	Sensible, de grano fino	N/A
2	Suelos orgánicos-arcillas	> 3,6
3	Arcilla - Arcilla lamosa para arcilla	2,95 - 3,6
4	Limos mixtos- Limo arcilloso para arcilla limosa	2,6 - 2,95
5	Arenas mixtas- arenas limosas para limos arenosos	2,05 - 2,6
6	Arenas - arenas puras para arenas limosas	1,31 - 2,05
7	Arena gravosa para arenas densas	< 1,31
8	Arena muy rígida para arena arcillosa	N/A
9	Grano muy fino rígido	N/A

Fig. 62 Tabla de la clasificación SBT con I_c correspondiente por tipo de suelo.

El siguiente gráfico muestra el índice de comportamiento mecánico (I_c) con respecto la profundidad en los ensayos CPTu 1 y 2, para obtener una observación estratigráfica del subsuelo, como se realizó con los parámetros anteriores de U y q_c .

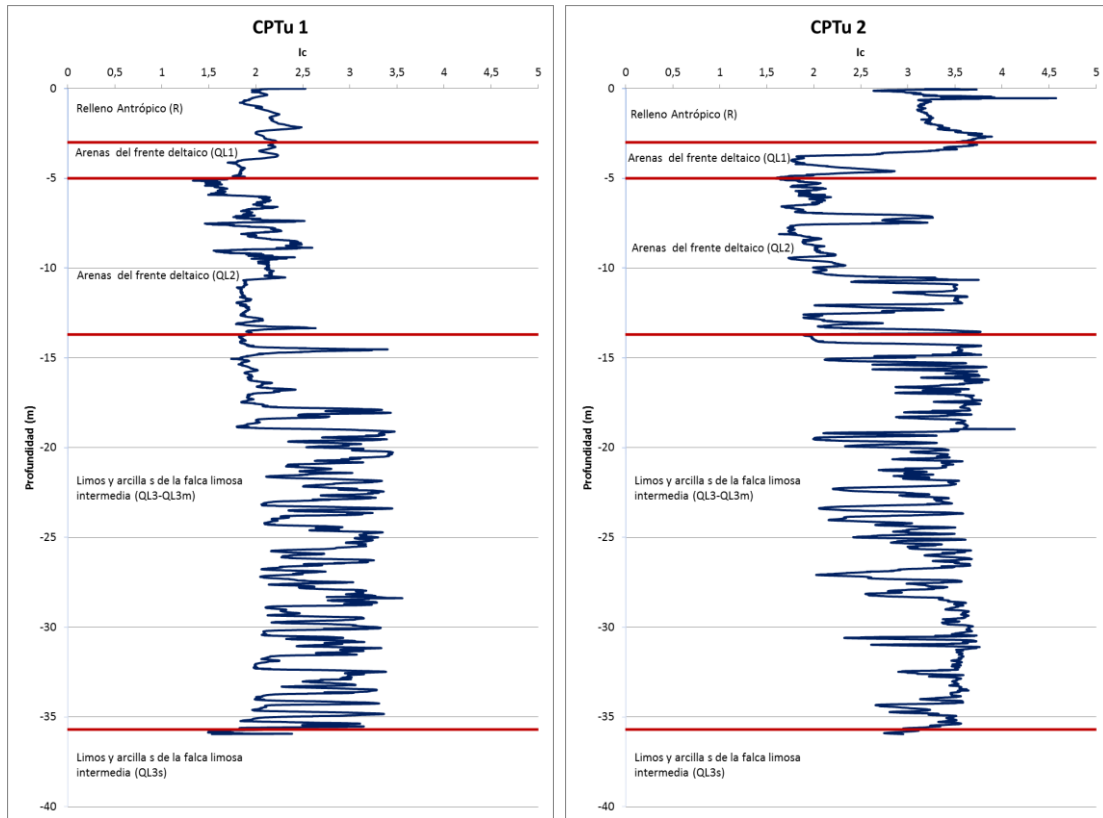


Fig. 63 Gráfico que muestra I_c de los ensayos CPTu con respecto a la profundidad.

Posteriormente, Robertson y Wride (1998) y Zhang et al. (2002) observaron que tal correspondencia entre la formula analítica y el gráfico sólo era válida en algunos casos. Para extender su rango de aplicación se sugirió incluir en la normalización de los parámetros del cono una dependencia exponencial de la tensión efectiva “in situ”, descrita mediante el parámetro n :

$$Q_{tn} = [(q_t - \sigma_{v0})/p_a](p_a/\sigma'_{v0})^n$$

donde:

- $(q_t - \sigma_{v0})/p_a$ es la dimensión resistencia cono neta.
- $(p_a/\sigma'_{v0})^n$ es el factor de normalización de la tensión., donde p_a es la presión atmosférica en las mismas unidades como el q_t y σ_{v0} ; y n es el exponente de tensión que depende del tipo de suelo.

Wroth et al (1984) demostraron que una normalización con la tensión de la resistencia del cono usando $n = 1$, es apropiado cuando la línea normalmente consolidada es esencialmente paralela con la CSL. Sin embargo, en las arenas, el CSL es claramente no lineal en un amplio rango de tensiones y las líneas de consolidación pueden variar con respecto a la CSL. Por lo tanto, parece que la mecánica del suelo en estado crítico apoyaría el concepto de un exponente de la tensión variable para normalizar la resistencia a la penetración y que el exponente de la tensión puede estar alrededor de 0,5 a bajas tensiones y que tiende hacia 1,0 a altas tensiones cuando la línea CSL se convierte en recta y la línea de consolidación de arenas se convierte en paralela a la CSL.

Zhang et al. (2002) sugirieron que el exponente de tensión n , podría ser estimado usando el propio índice de SBTn, I_c , mediante:

$$n = 0,381(I_c) + 0,05(\sigma'_{v0}/p_a) - 0,15$$

donde $n \leq 1,0$.

Como I_c es a su vez de Q_{tn} (y por tanto de n) es necesario aplicar la fórmula de forma iterativa. El primer paso es suponer un valor de $n = 1$. Posteriormente se procederá a obtener el nuevo Q_t y I_c . Las iteraciones continúan hasta que el cambio de n sea pequeño, por ejemplo $\Delta n \leq 0,01$.

Para el caso que correspondería este informe, se tuvieron que realizar un total de 5 iteraciones con los datos brutos para obtener los perfiles ajustados de I_c y n . En lo que sigue se representan los datos antes y después de realizar este proceso de ajuste iterativo, con el fin de ilustrar su importancia.

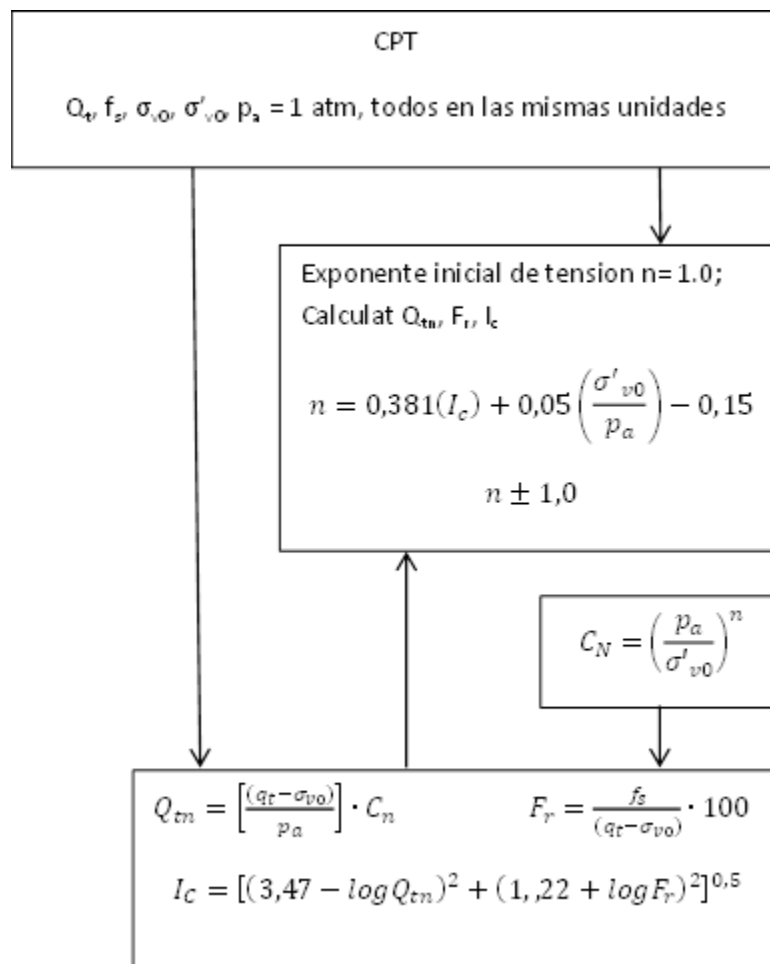


Fig. 64 Diagrama de flujo para evaluar la proporción de resistencia cíclica (CRR7.5) del CPT (Después de Robertson, 2009).

donde:

- q_t : parámetro de resistencia al cono corregido.
- f_s : resistencia de la fricción lateral.
- σ_{v0} : tensión vertical inicial.

- σ'_{v0} : tensión vertical inicial efectiva.
- p_a : presión atmosférica.
- I_c : índice de comportamiento mecánico.
- Q_{tn} : parámetro de resistencia al cono normalizado iterado.
- F_r : rango de fricción.

Clasificación de los datos en el Grafico de Robertson Q_t - F_r ,

En este apartado tomamos los datos de los CPTu que corresponde a los niveles establecidos en la estratigrafía del proyecto (basada en sondeos) y vemos si la clasificación SBT de los puntos de los ensayos CPTu correspondientes a cada nivel encaja en tal descripción.

- Relleno Antrópico

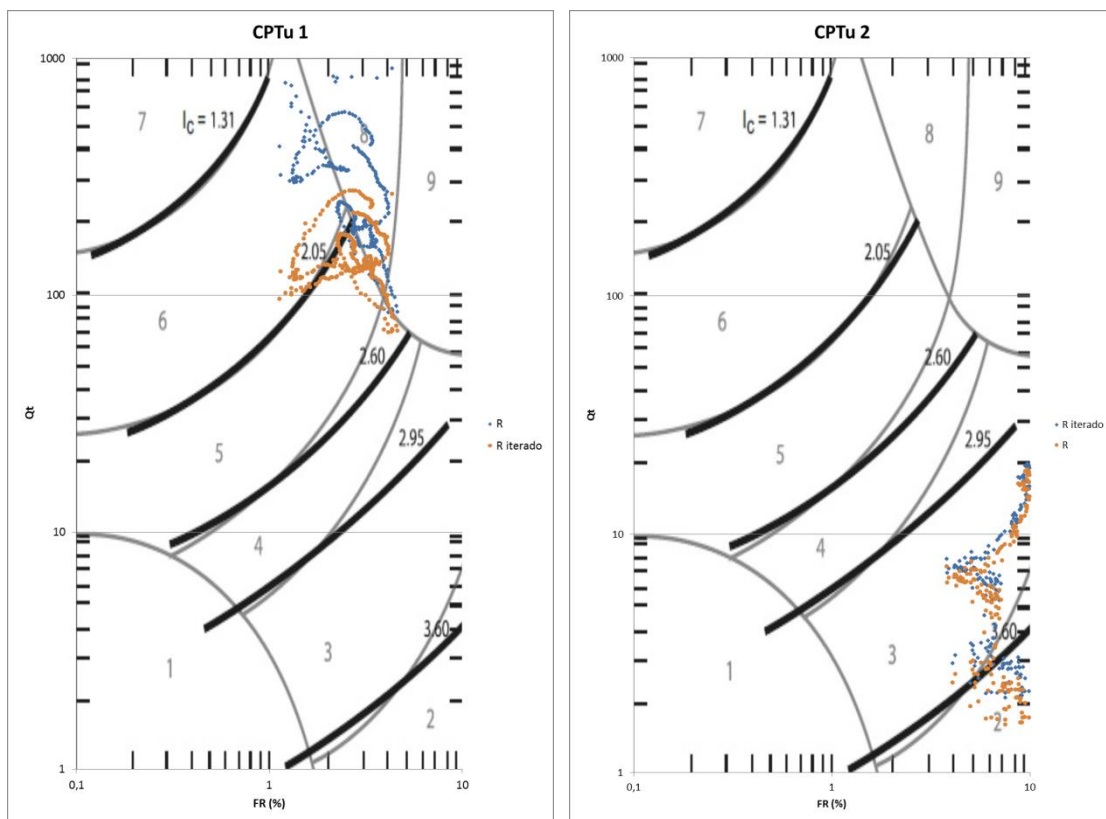


Fig. 65 Gráfico según el modelo de Robertson comparando Q_t con F_r en el nivel de relleno antrópico (R)

Como se pueden apreciar, en el primer nivel estratigráfico del subsuelo, la típica heterogeneidad de los materiales correspondientes a rellenos antrópicos. Si observamos con más detalle cada ensayo, en CPTu 1 los datos muestran que los materiales que compondrían a este nivel serían arenas muy rígidas o arenas arcillosas, aunque se observa en el grafico la diferencia de la Q_t iterada, y la normal, donde la más grande se halla en que la iterada muestra materiales de arenas limosas.

En el ensayo CPTu 2, hay una diferencia con el anterior, y es el aumento de la proporción de los materiales cohesivos incluyendo desde materiales finos endurecidos hasta arcillas. En este caso la diferencia entre Q_t normal y la iterada es poca.

- Arenas de Frente Deltaico (QL1)

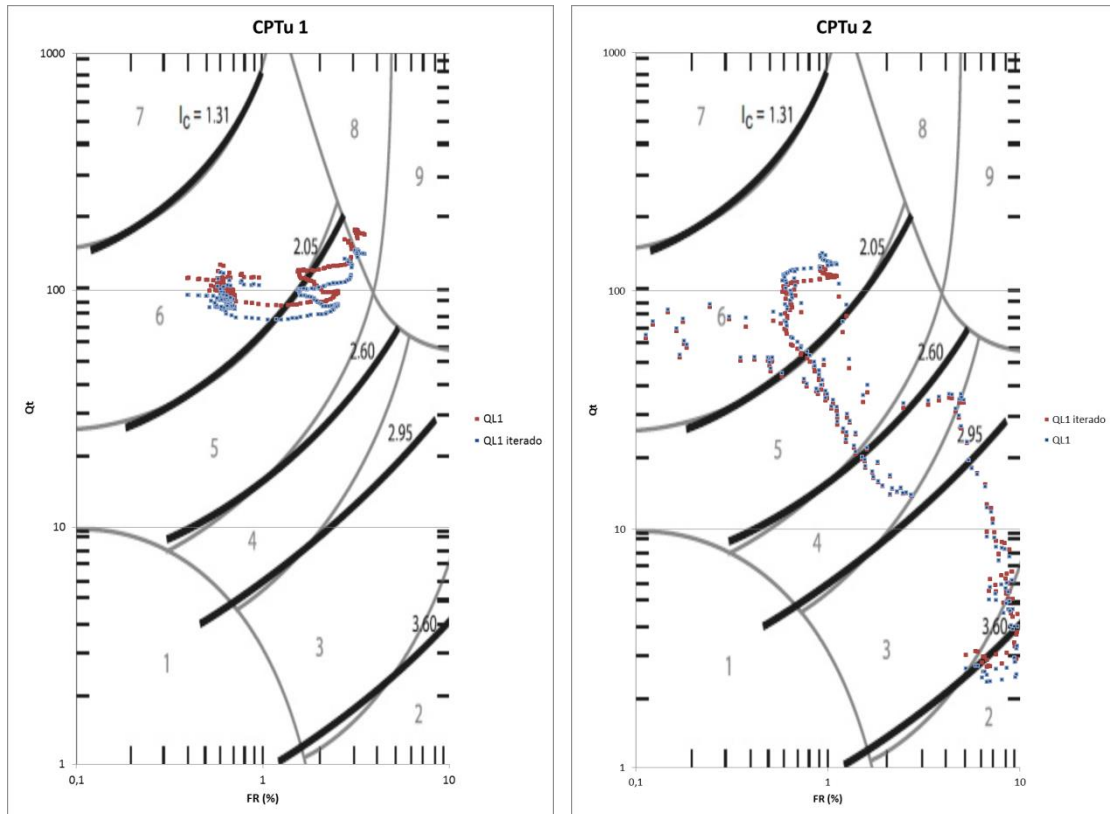


Fig. 66 Gráfico según el modelo de Robertson comparando Q_t con F_r en el nivel de arenas de frente deltaico (QL1)

Como se aprecia en el título del nombre de este nivel, en ambos ensayos el material predominante correspondería a materiales granulares. Esto se corresponde bastante con el resultado del ensayo CPTu 1, que indica materiales arenosos, y arenosos mixtos.

Por el contrario, si se observa en el ensayo CPTu 2, aunque hay un predominio de materiales granulares, sobretodo arenas, en este sector se halla una gran proporción de materiales cohesivos. Esto podría indicar una zona de intercalaciones de materiales granulares de mayor potencia con intercalaciones de materiales finos.

En este nivel no hay gran diferencia entre el Q_t y el Q_t iterado, lo que es lógico dado que es un nivel relativamente somero y el nivel de tensiones efectivas (al que afecta el exponente n) es relativamente pequeño.

Como se observa en este caso, las facias deltaicas no presentan una continuidad fija lateral, presentando en algunas zonas materiales más finos o más granulares dependiendo del nivel del mar.

- Arenas de Frente Deltaico (QL2)

Como se observa en el título de este nivel, correspondería a la segunda parte de estas facies de frente deltaico, donde seguiría predominando los materiales granulares.

Si se analiza los datos del ensayo CPTu 1 en el gráfico, se observa que en este nivel seguirían predominando los materiales granulares finos (arenas y arenas limosas) ($SBT_n = 5$ y 6)

Con respecto al ensayo de CPTu 2, se observa una diferencia con respecto al anterior ensayo. En este nivel, la gran mayoría de los materiales serían arenas y arenas mixtas, aunque, como se puede observar, habrá niveles intercalados de arenas limos y arcillas ($SBT_n = 4$ y 3).

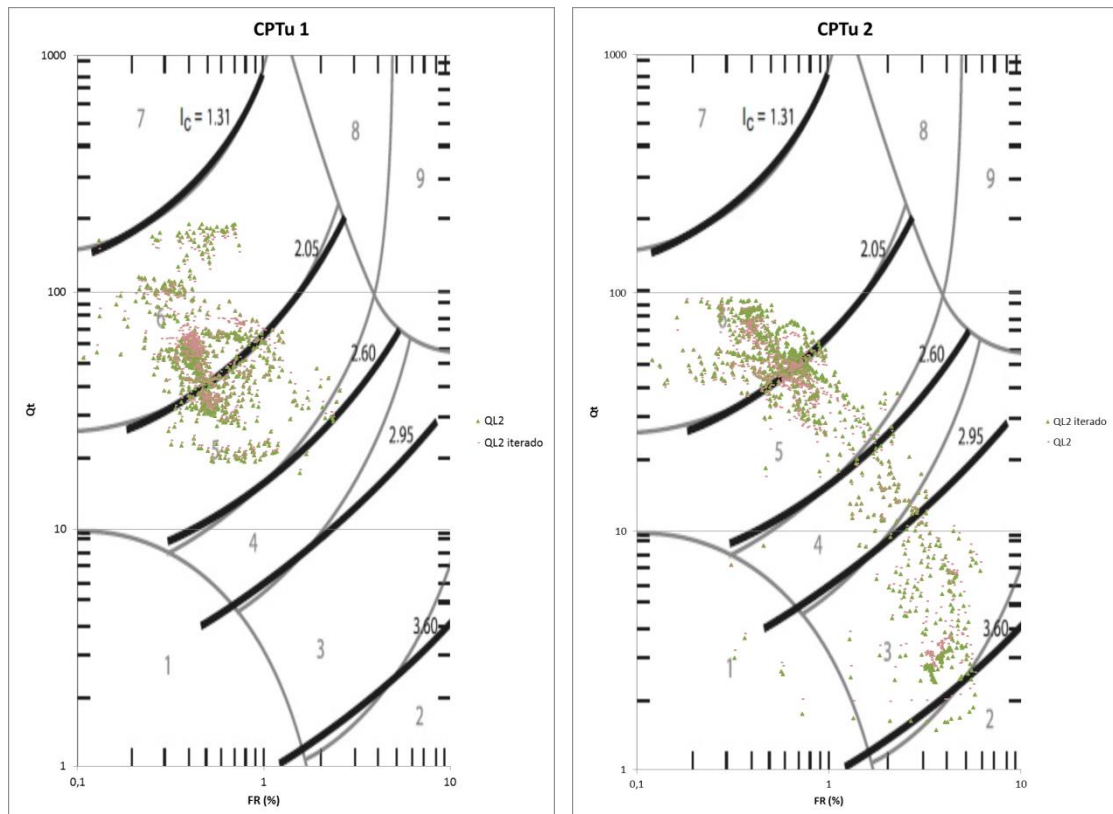


Fig. 67 Gráfico según el modelo de Robertson comparando Q_t con F_r en el nivel de arenas de frente deltaico (QL2)

- Limos y arcillas de la falca limosa intermedia (QL3-QL3m)

Como indica el nombre, según los informes anteriores, esta estaría compuesta mayoritariamente por materiales cohesivos. Pero los resultados de los ensayos de CPTu, indican una componente granular bastante importante.

En el primer gráfico se muestran los valores obtenidos de los resultados del ensayo de CPTu 1, donde se observa claramente la igualdad de proporción de los materiales granulares (arenas y arenas mixtas), con respecto a los materiales cohesivos, pudiéndose deducir un alternancia de estratificaciones granulares-cohesiva.

Si se observa el CPTu 2, claramente esta tendencia desaparece, teniendo una predominancia de materiales cohesivos respecto a los granulares. La normalización empieza a tener efectos significativos, lo que más llama la atención es que la diferencia que hay entre la Q_t normal, presenta una proporción mayor de limos, y la Q_t iterada, donde el material cohesivo mayoritario correspondería a materiales arcillosos ($SBT_n = 3$).

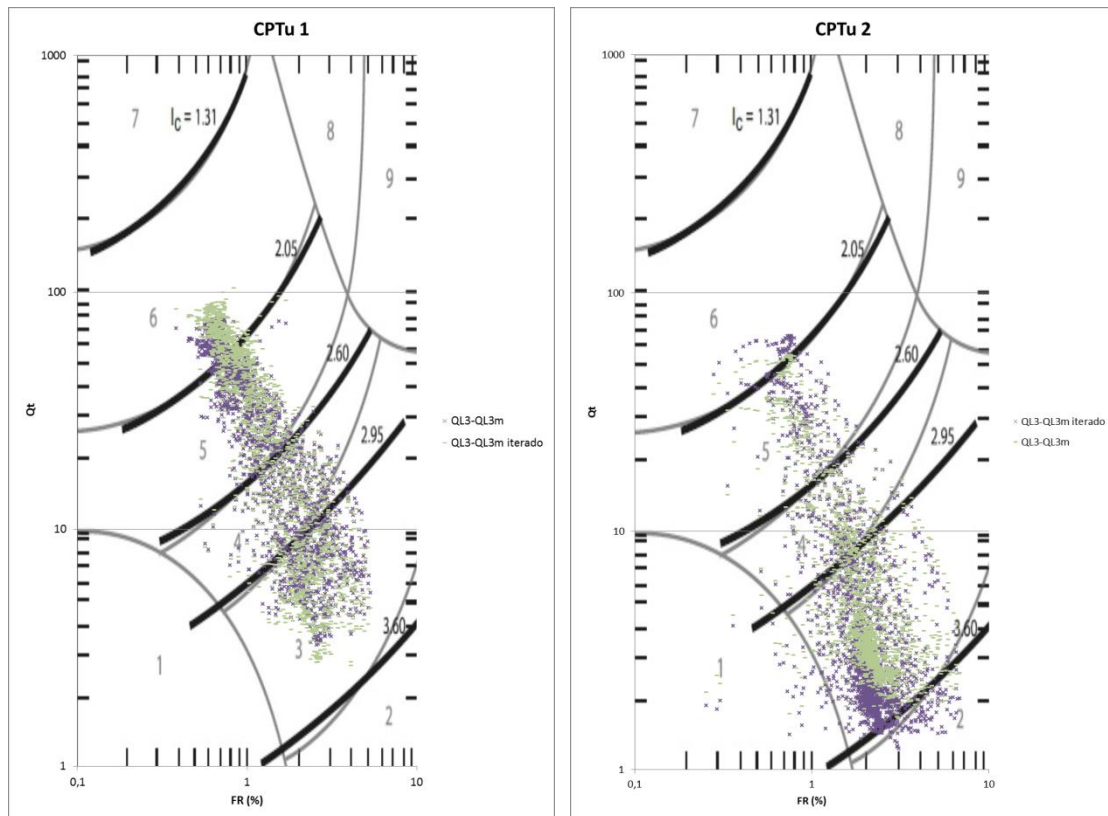


Fig. 68 Gráfico según el modelo de Robertson comparando Q_t con F_r en el nivel de limos y arcillas de la falca limosa intermedia (QL3-QL3m)

- Limos y arcillas de la falca limosa intermedia (QL3s)

Según la estratigrafía del proyecto, este nivel estaría compuesto por una formación de limos bastante arenosos. Al observar los datos del gráfico del CPTu 1 en el gráfico de Robertson, se puede apreciar (aunque no hay un gran número de datos) serían materiales arenosos. En el ensayo de CPTu 2, hay una mayor cantidad de datos. En este ensayo los datos muestran que para este sector, aunque hay una proporción de arenas ($SBT_n = 5$), también se observa materiales cohesivos, sobretudo arcillas, pero esto solo sería para el caso de la Q_t normal. En cambio, los datos de la Q_t iterado, muestra una mayor proporción de materiales granulares.

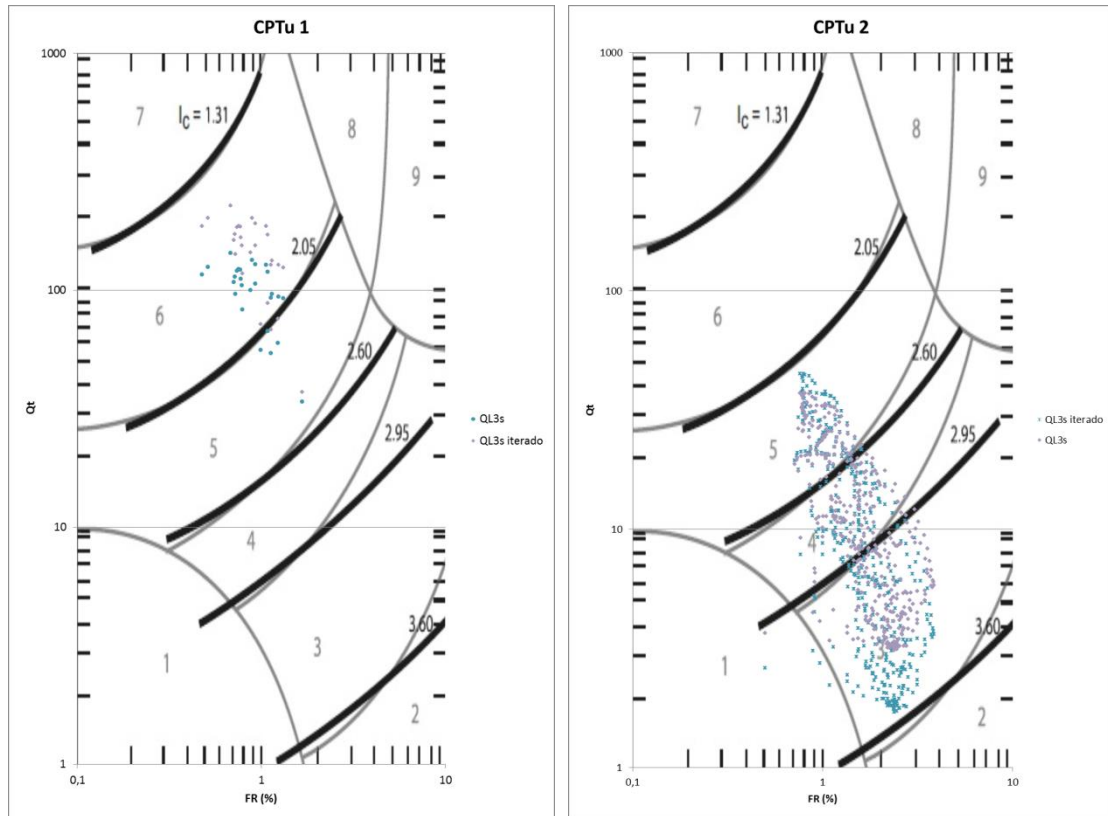


Fig. 69 Gráfico según el modelo de Robertson comparando Q_t con F_r en el nivel de limos y arcillas de la falca limosa intermedia (QL3s)

6.2.4 Aplicación de la clasificación de Schneider

Al igual que Robertson, Schneider propuso un tipo de gráfico para la clasificación del suelo a partir de los resultados CPTU, basado en la resistencia al cono normalizado (Q_t) y exceso de la presión de poro normalizado ($\Delta u_2/\sigma'_{v0}$). Superpuesto Al gráfico de Schneider, están contornos de B_q que ilustra la relación con $\Delta u_2/\sigma'_{v0}$, y también están los contornos aproximados de OCR. La aplicación del modelo de Schneider puede ser problemático para muchos proyectos onshore donde los resultados de presión de poro del CPTu no serán de confianza, debido a la pérdida de saturación. Sin embargo, para proyectos offshore, donde el sensor de CPTu saturado es más fiable, y en proyectos onshore en suelos de grano fino blando con mucha agua, el gráfico puede ser de mucha ayuda. El modelo de Schneider et al, es centrado principalmente en suelos de grano fino con exceso de presión intersticial y Q_t es pequeño.

Descripción del Grafico de Schneider $Q_t - \Delta u_2/\sigma'_{v0}$

Se realizaron estudios paramétricos de la relación entre la resistencia punta del cono y la presión de poro de penetración durante la penetración no drenada realizada, combinando los resultados a través de elementos finitos de grandes deformaciones para penetración no drenada de un cono discutido por Lu et al (2004) y el modelo de expansión de estado crítico cavidad híbrido de las presiones de poro de penetración desarrollados por Mayne (1992). Basado en estos estudios paramétricos, datos de ensayos con rangos variables de penetración, así como una notable cantidad de datos de campo de ensayos de piezocono probados en arenas, limos, arcillas y suelos mixtos, Schneider et al. (2007) propuso unos gráficos de clasificación de suelos basados en Q_t y $\Delta u_2/\sigma'_{v0}$.

Cuatro formulas empíricas fueron usadas para encajar el análisis teórico, separando los tipos de suelo como:

- Arcillas sensibles (no drenado).
- Arcillas (no drenado).
- Limos (parcialmente consolidado) y arcillas de “bajo I_T ” (no drenado).
- Arenas o arenas mixtas (esencialmente drenadas).
- Suelos transicionales (drenado, no drenado, o parcialmente consolidado).

Esas ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\Delta u_2}{\sigma'_{v0}} > \frac{Q^{0,91}}{1,5} + 1,1$$

$$\frac{\Delta u_2}{\sigma'_{v0}} > \frac{Q^{0,95}}{5} + 1,05$$

$$\frac{\Delta u_2}{\sigma'_{v0}} > \frac{Q^{1,25}}{100} + 0,99$$

$$\max \left[-0,5 \ln \left(\frac{Q}{20} \right) - 1 \right] \leq \frac{\Delta u_2}{\sigma'_{v0}} \leq \min \left[0,5 \ln \left(\frac{Q}{20} \right), 1 \right]$$

con valores de Q en la ecuación 9 sea ≥ 20 .

A raíz de estas ecuaciones, se procede a realizar como en el apartado del modelo de Robertson, donde se mostraran los datos de cada nivel estratigráfico del proyecto según este modelo.

- Relleno Antrópico (R)

Como se observan en los gráficos, hay una gran diferencia entre cada uno de los ensayos. En el caso del ensayo de CPTu 1, se puede observar como la mayoría de los datos se hallan cerca del campo de arenas drenadas. Pero si se compara con los datos del ensayo de CPTu 2, estos se puede observar una gran heterogeneidad, teniendo principalmente suelos transicionales, aunque también se pueden hallar arcillas.

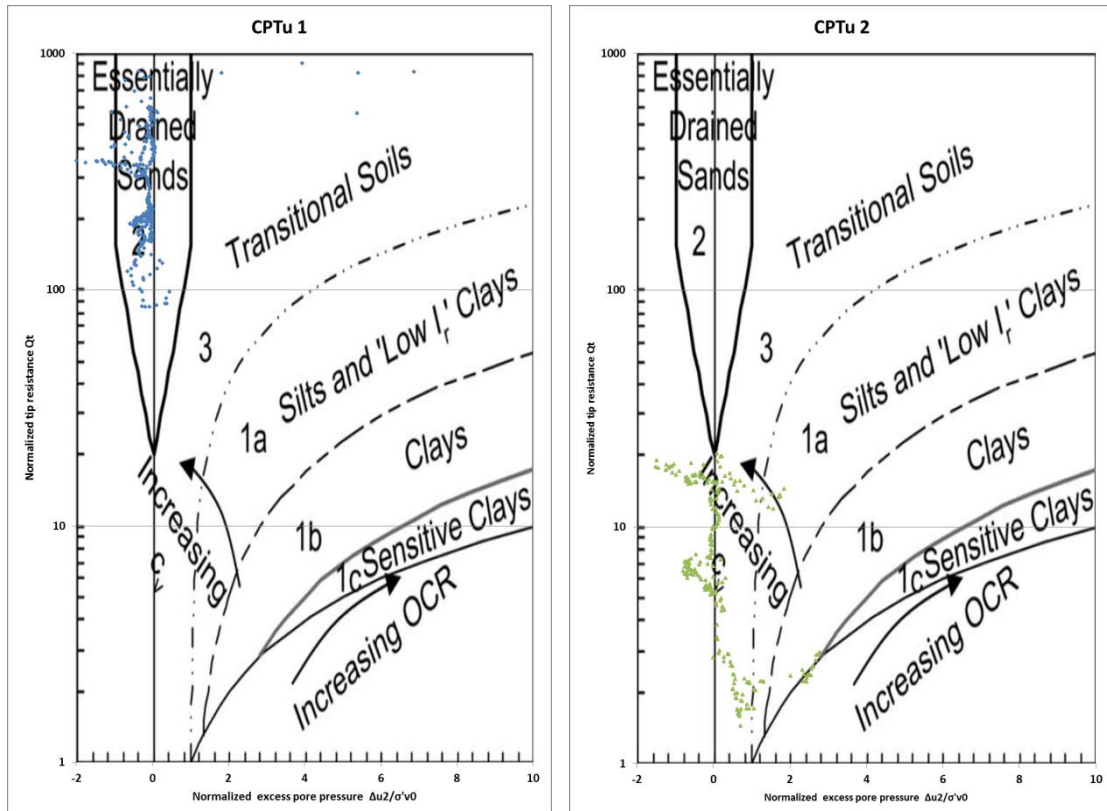


Fig. 70 Gráfico de Schneider del nivel estratigráfico del relleno antrópico.

- Arenas de Frente Deltaico (Unidad QL1)

Como se observa en los gráficos, este nivel correspondería a materiales que presentarían un comportamiento cercano de arenas drenadas esencialmente, como se ejemplificaría con el ensayo de CPTu 1, aunque se muestra en el ensayo de CPTu 2, que los datos también se hallan suelos transicionales y arcillas.

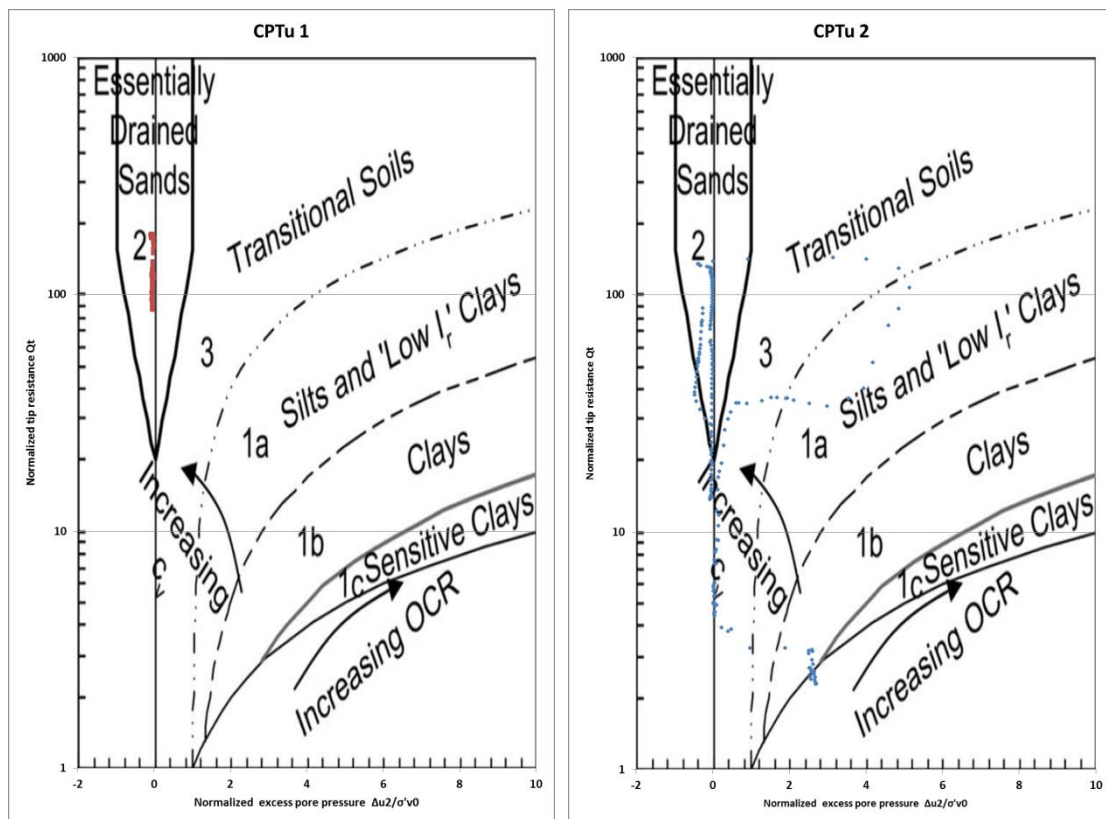


Fig. 71 Gráfico de Schneider del nivel estratigráfico del QLI.

- Arenas de Frente Deltaico (Unidad QL2)

Como se observa en la siguiente figura, este nivel se halla caracterizada por la predominancia de materiales granulares, principalmente arena, como se puede ejemplificar en el grafico del ensayo de CPTu 1, donde los datos se hallan cerca del sector de esencialmente arenas drenadas.

Pero, si se observa el gráfico de CPTu 2, esta tendencia continua, pero en este sector, el material que se hallaría en ese nivel estaría intercalado con niveles cohesivos, siendo mayoritarios los suelos transicionales.

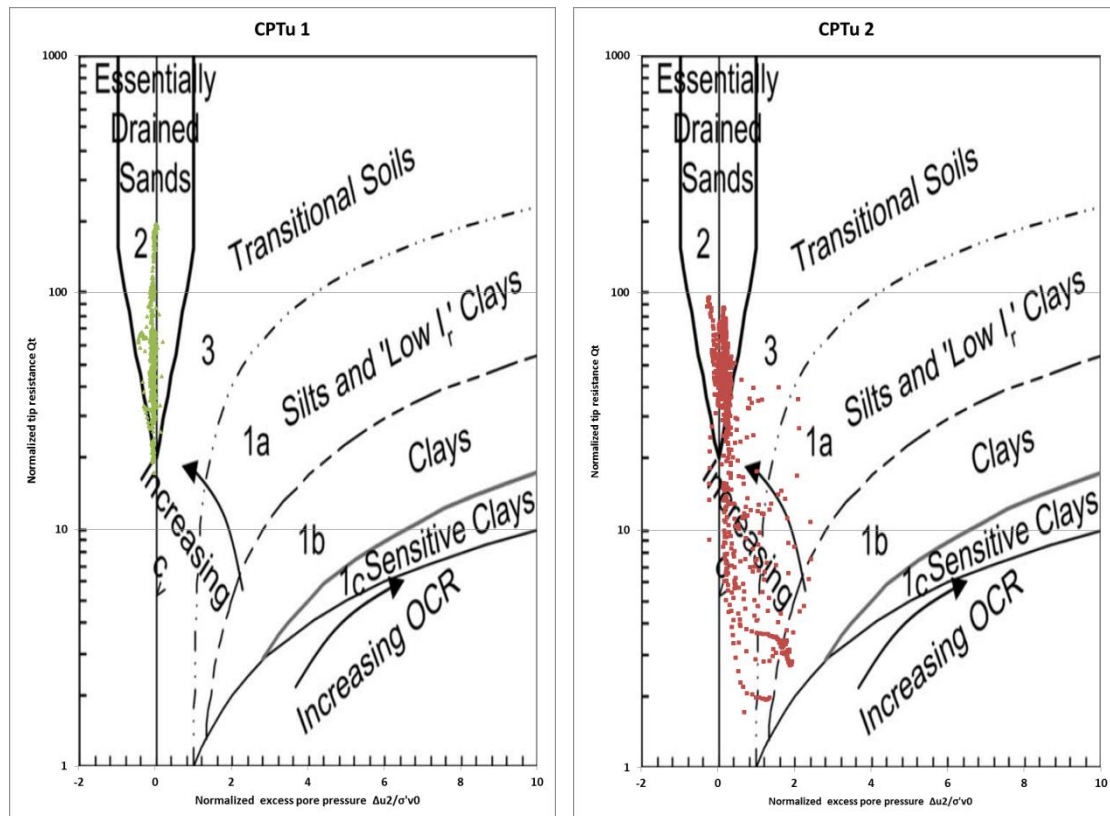


Fig. 72 Gráfico de Schneider del nivel estratigráfico del QL2.

- Limos y arcillas de la falca limosa intermedia (Unidad QL3-QL3m)

Los gráficos anteriores muestran claramente la composición de una falca intermedia de un delta, compuesto principalmente por materiales cohesivos, pero comparando ambos gráficos, vemos que no es un conjunto homogéneo.

Si se observa el ensayo de CPTu 1, el sector del QL3-QL3m, hay una gran proporción de materiales cohesivos, siendo mayoritario el limo y los suelos transicionales, aunque podemos observar que también se muestra que hay arenas drenadas esencialmente, pudiéndose ejemplificar el conjunto de ese gráfico como el principio del bloque de la facia.

En cambio, si se observa los valores mostrados en el ensayo de CPTu 2, aunque se observa cierta cantidad de materiales granulares, el conjunto de los valores se hallan en limos y en arcillas.

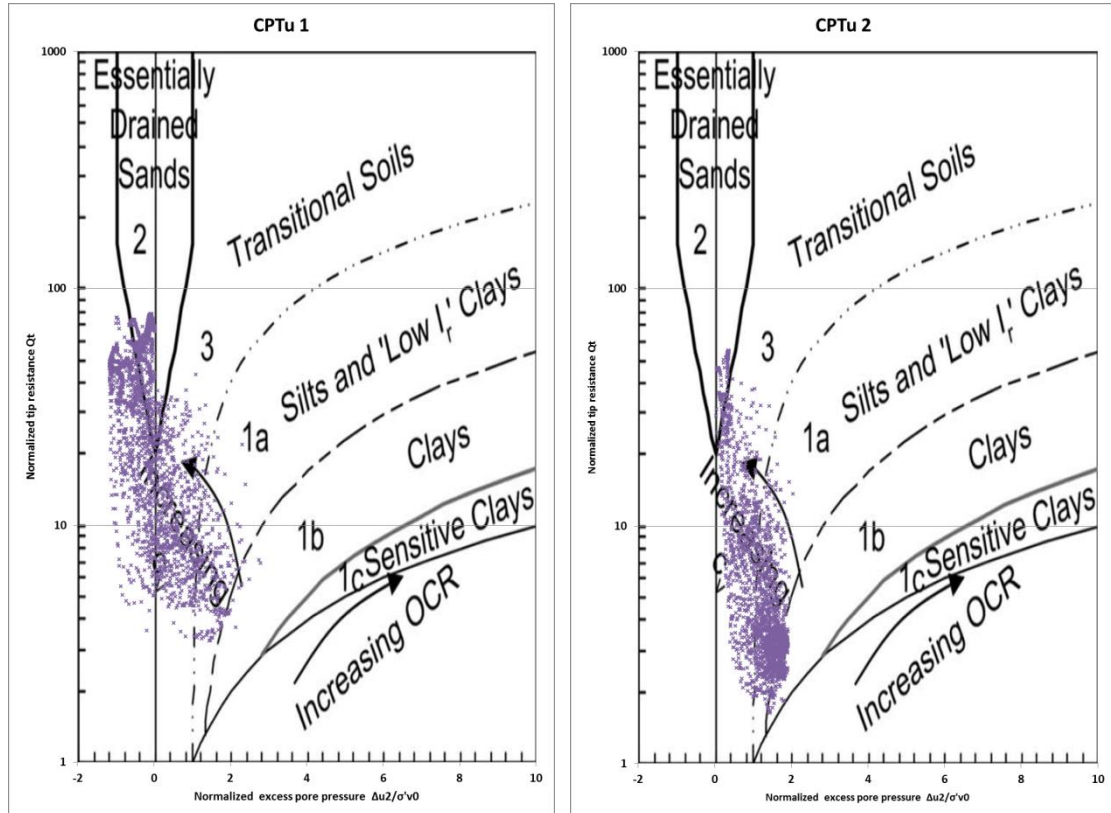


Fig. 73 Gráfico de Schneider del nivel estratigráfico del QL3-QL3m.

- Limos y arcillas de la falca limosa intermedia (Unidad QL3s)

Como se observa en el título del nivel, nos hallaríamos en el conjunto de limos y arcillas de las facies deltaicas, pero este hecho puede contrastarse que no tienen una continuidad lateral, de los estratos, y estos se ejemplifican en ambos gráficos. En el primer gráfico, correspondiente al ensayo de CPTu 1, aunque no haya una gran cantidad de valores, se clasificaría como arenas drenadas.

Si se analiza los datos del ensayo de CPTu 2, mostrados en el gráfico de la derecha, se puede ver como la totalidad de materiales estarían conformados por suelos transicionales y materiales cohesivos. Esto demuestra nuevamente la dificultad de estudio de esta región.

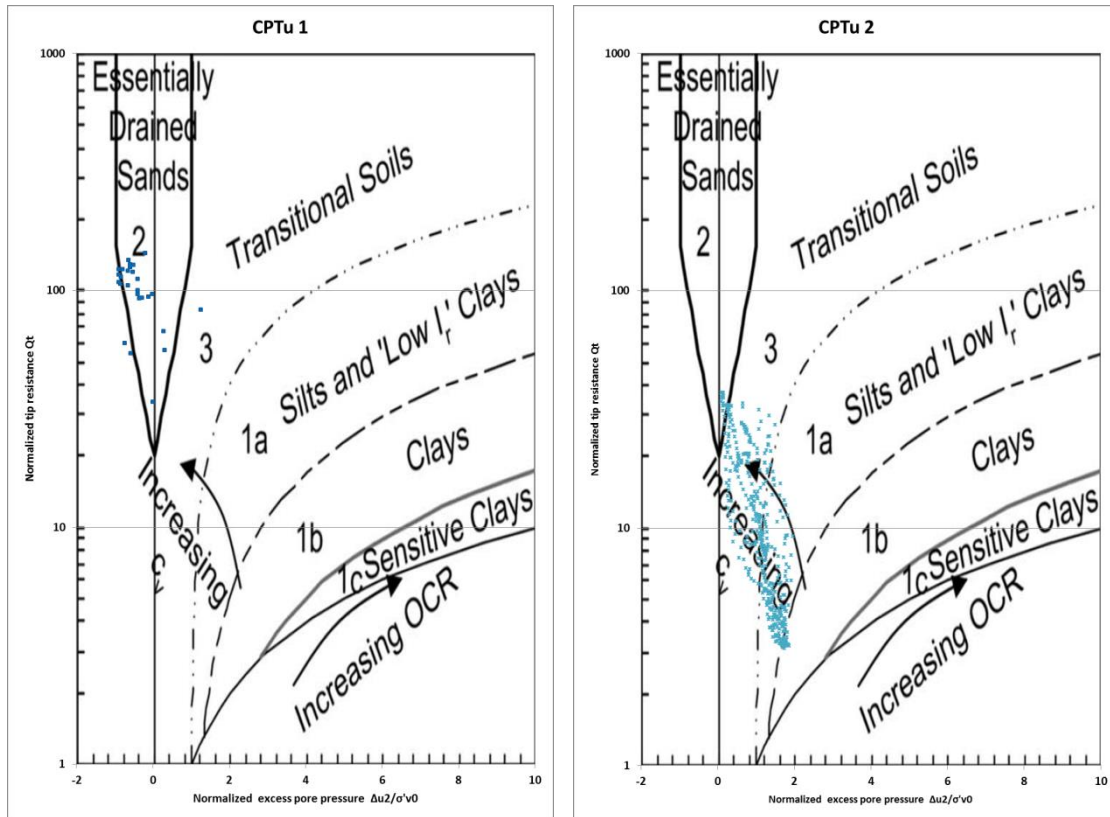


Fig. 74 Gráfico de Schneider del nivel estratigráfico del QL3s.

6.3 Análisis del Grado de Sobreconsolidación del suelo (OCR)

6.3.1 Introducción

El grado de sobreconsolidación (OCR) es definido como la relación entre la tensión efectiva vertical máxima histórica y la tensión efectiva vertical en el instante de la observación:

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}$$

donde:

- σ'_{vo} es la tensión vertical en el instante de la medición
- σ'_p es la tensión vertical máxima del suelo, o también llamado presión de sobreconsolidación.

Para la sobreconsolidación mecánica de los suelos, en los cuales el único cambio ha sido quitarles el esfuerzo de sobrecarga, la ecuación anterior es apropiada (Chen y Mayne 1996). Sin embargo, en suelos cementados y/o envejecidos, la relación de sobreconsolidación puede presentar una relación entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo efectivo presente en la actualidad. El esfuerzo de fluencia dependerá de la dirección y del tipo de carga (Mayne, Robertson y Lunne 1998).

Para arcillas sobreconsolidadas:

$$(S_u/\sigma'_{vo})_{oc} = (S_u/\sigma'_{vo})_{NC}(OCR)^{0.8}$$

Basado en esto, Robertson (2009) sugirió que:

$$OCR = 0,25(Q_t)^{1,25}$$

Aunque anteriormente Kulhawy y Mayne (1990) habían descrito un método muy simple:

$$OCR = k \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) = k Q_t \quad \text{ó} \quad \sigma'_p = k (q_t - \sigma_{vo})$$

Donde el valor de k se halla en un rango de 0,2 a 0,5. La determinación exacta del valor se debe ajustar a través de reflejar la experiencia, para dar un perfil de OCR óptimo. Kulhawy and Mayne simplificaron el valor de k a 0,33, para valores de Q_t inferiores a 20. Para proyecto de grandes dimensiones donde ha de haber una precisión muy alta de los datos en el campo y en el laboratorio, se deberán tener en cuenta todos los aspectos para dar unos valores de OCR correctos.

6.3.2 Aplicación al caso

A través de los cálculos comentados anteriormente, se procedió a aplicarlo sobre ambos ensayos. Como se ha comentado en el apartado anterior, en el caso de la correlación del OCR, solo puede obtenerse para arcillas sobreconsolidadas, por tanto, para delimitar el rango de aplicación de las ecuaciones a los datos que reúnan esta especificación, se utilizará el índice de comportamiento mecánico para filtrar los datos ($I_c > 2,95$). La línea verde correspondería a la tendencia general del OCR con respecto a la profundidad.

El siguiente gráfico muestra los resultados del ensayo CPTu 1, donde se puede ver claramente que, aunque para la fórmula de Kulhawy y Mayne la realización de la iteración no provocó grandes efectos en los resultados, en el caso de Robertson, provocó una disminución de los datos, debido al aumento de niveles arenosos obtenidos a través de la clasificación del índice de comportamiento (I_c).

Aún con estas diferencias, se observa claramente que la mayoría de los materiales se hallarían en el lindar de materiales sobreconsolidados, aunque estas valoraciones solo pueden ser tomadas como estimaciones.

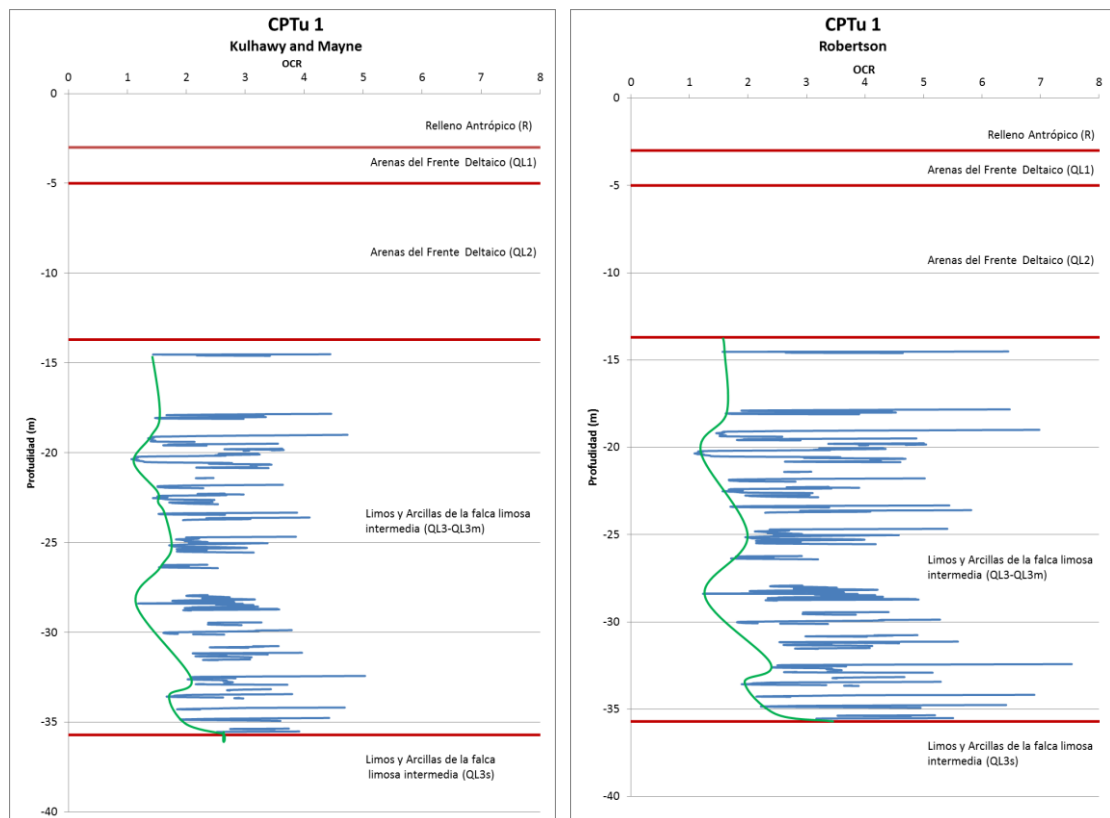


Fig. 75 Gráficas que muestran el OCR del subsuelo a través de las ecuaciones de Kulhawy y Mayne y Robertson en los datos del ensayo de CPTu 1.

En el siguiente gráfico se exponen los datos del ensayo CPTu 2. Como primera observación, podemos ver claramente en términos generales el aumento las arcillas, en comparación con el anterior ensayo, dando valores máximos en ambos cálculos (Kulhawy y Mayne, y Robertson) de 8, dando en la mayoría de los materiales valores de sobreconsolidación. En ambos casos se excluyeron las arcillas mixtas, debido a que al hallarse en una zona de intercalaciones de materiales cohesivos con granulares, se consiguen evitar las zonas de transición, para dar unos resultados más óptimos.

En este caso, al no haber una gran cantidad de arenas, la realización de la iteración solo produjo una disminución del valor de OCR, siendo muy abrupta en materiales más superficiales.

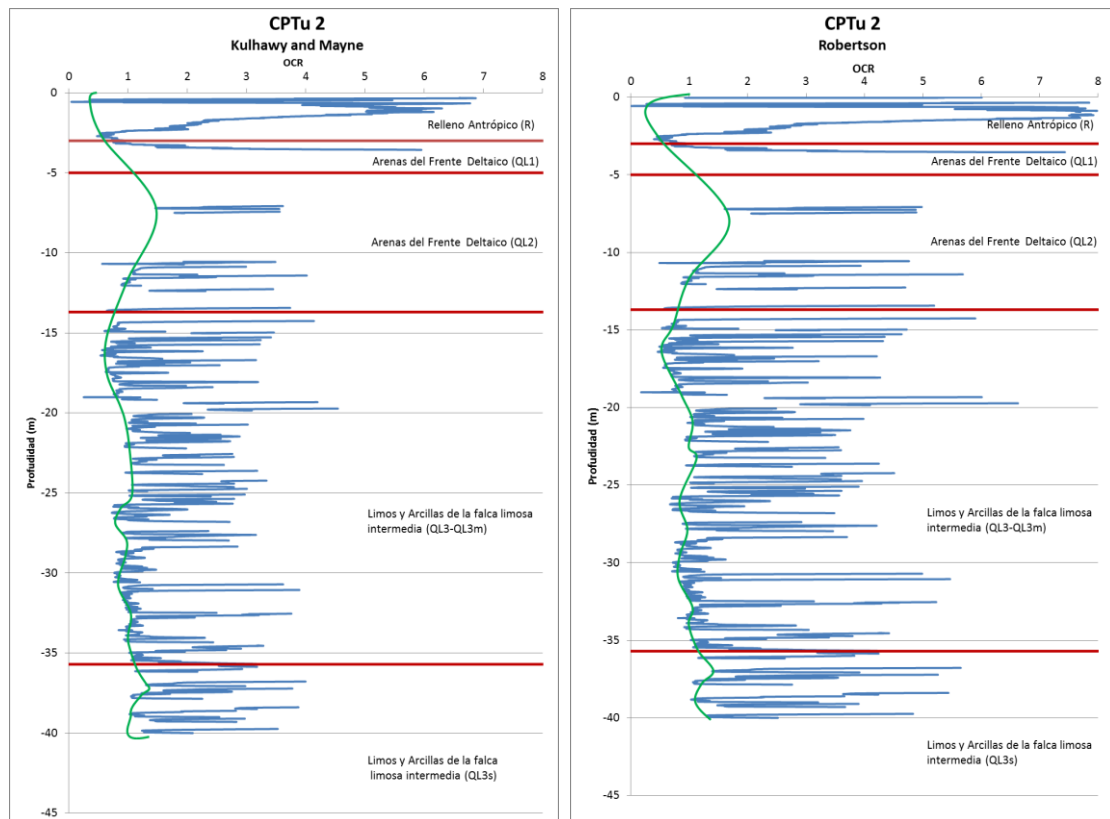


Fig. 76 Gráficas que muestran el OCR del subsuelo a través de las ecuaciones de Kulhawy y Mayne y Robertson en los datos del ensayo de CPTu 2.

6.4 Obtención del E de los ensayos de CPTu

6.4.1 Introducción

A través de los datos de los ensayos de CPTu se puede realizar una estimación del módulo, para posteriormente ser usado para métodos de predicción de asentamientos. Pero, las correlaciones entre q_c y el módulo de Young (E), pueden ser susceptibles a la historia de las tensiones y la deformación, y la mineralogía.

Debido a ello, puede ser usado como guía para estimar el módulo de Young más moderno del terreno, sin cimentar, y siendo arenas silíceas predominantemente. El módulo ha sido definido como movilizizado sobre un 0,1% de deformación.

Para este caso se definió el módulo de Young como:

$$E' = \alpha_E \cdot (q_t - \sigma_{v0})$$

donde:

$$\alpha_E = 0,015 [10^{(0,55I_c + 1,68)}]$$

6.4.2 Aplicación al caso

Como sucedió en el caso anterior, la correlación de E a través de los datos extraídos de los ensayos de CTPu, solo se puede ejecutar sobre las arenas, y por tanto, se utilizó el parámetro de I_c aplicar solo sobre los materiales arenosos ($I_c=2,6 - 1,31$).

Esta correlación fue aplicada sobre los datos extraídos de los ensayos de CPTu, y se obtuvieron los siguientes gráficos.

Como puede observarse a simple vista, la realización del proceso de iteración con respecto al exponente de tensión, produjo que los valores que a través de los datos del I_c fueran clasificados como arenas sufrieran ciertos cambios, como se demuestra en los gráficos anteriores. En el caso del ensayo de CPTu 1, produjo que la cantidad de materiales que contenían arenas fuera mayor en el sondeo que en el origen, pero por el contrario, en el caso del ensayo de CPTu 2, disminuye considerablemente. Esto demuestra que el valor de tensión es mayor en estos materiales, y por tanto serán en realidad materiales mucho más rígidos., y va aumentando conforme va aumentando la profundidad.

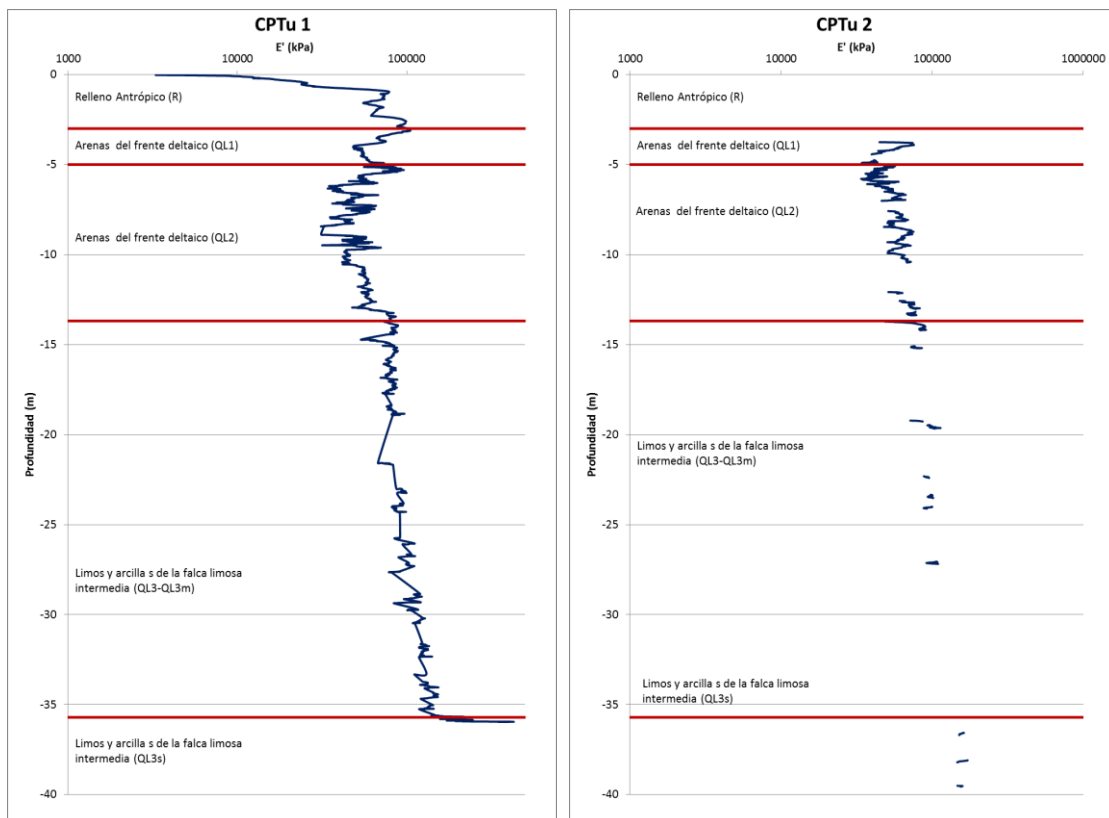


Fig. 77 Gráficas de representación del parámetro E con respecto la profundidad.

6.5 Comparación de los resultados “in situ” con los de laboratorio

6.5.1 Introducción

En anteriores apartados se ha procedido a narrar los procedimientos para extraer los parámetros de campo, y posteriormente realizar las correlaciones posteriores para hallar los parámetros de estratigrafía, resistencia y deformabilidad.

También se aplicaron esos procedimientos sobre los ensayos de CPTu realizados en la estación de Verge de Montserrat en Barcelona de la L9. A través de estos datos, en este capítulo se mostrará la comparación de los datos extraídos del laboratorio provenientes de la muestra bloque 6 con respecto a los datos comentados de los ensayos de CPTu, centrados en el rango de profundidad de la muestra.

6.5.2 Análisis de la estratigrafía

Si se acota los análisis anteriores a la profundidad de donde se extrajo la muestra bloque 6, se observan las siguientes observaciones:

- SBTn Robertson
 - CPTu 1: Como se observa en el gráfico el material estaría compuesto por materiales de los sectores 6 y 5, que corresponderían a materiales arenosos y arenosos mixtos.
 - CPTu 2: El gráfico muestra, los materiales corresponderían según este modelo a materiales de los sectores 5, 4 y 3, teniendo mayor importancia el primero. A diferencia del anterior, habría cierta proporción de materiales cohesivos.

Como se observa en el gráfico, la comparación Q_t normal e iterada, tienen ciertas diferencias, pero no lo suficiente, como provocar grandes cambios en la composición de los materiales.

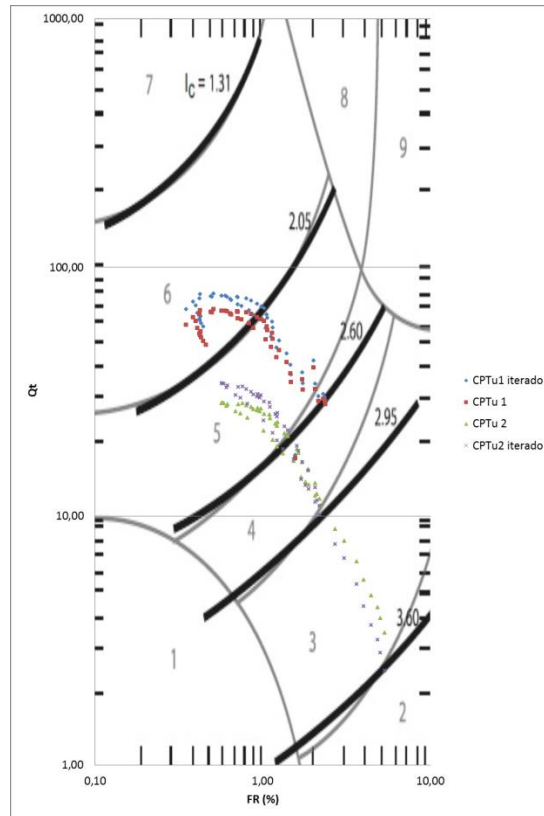


Fig. 78 Gráfica de Schneider mostrando los datos de CPTu 1 y CPTu 2, en el rango de profundidad del Bloque 6.

- Indice I_c

Debido a las grandes variaciones que se obtenían al comparar los gráficos de Q_t - F_t y el I_c , se procedió a realizar la iteración comentada en anteriores apartados, dando los resultados que se exponen a continuación.

- CPTu 1: En este ensayo se muestra con el índice de comportamiento que los materiales de este intervalo de la muestra bloque serían arenas y arenas con limos.
- CPTu 2: Con respecto a este ensayo, la muestra bloque, según los datos, muestra una cierta heterogeneidad, teniendo pequeños niveles arenas limosas, sobre todo al inicio de la muestra, y va disminuyendo este y va aumentando los limos, hasta que al final de la muestra se observan solo arcillas.

- Schneider

- CPTu 1: el gráfico nos muestra que los materiales que correspondería al nivel de donde se extrajeron la muestra bloque de este trabajo. Como se observa en el gráfico, la mayoría de los datos se hallarían en la zona de arenas drenadas esenciales

- CPTu 2: A diferencia del ensayo anterior, los datos de este CPTu se hallaría en la zona de suelos en transición, aunque se hallarían cercanos de las arenas.

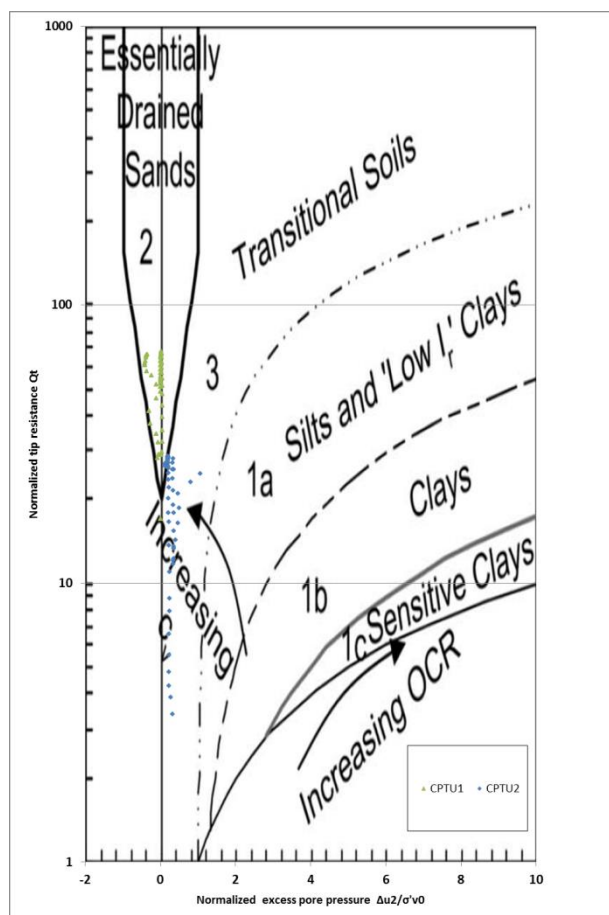


Fig. 79 Gráfica de Schneider mostrando los datos de CPTu 1 y CPTu 2, en el rango de profundidad del Bloque

Después de observar los resultados mostrados a través de los ensayos de CTPu podemos realizar una comparación con los datos obtenidos en el laboratorio de la muestra bloque inalterada B6, a través de las curvas granulométricas obtenidas de los diferentes ensayos (figuras 36 y 37). En la figura se observa los resultados obtenidos de dichos ensayos donde el bloque se clasificaría la parte superior como arcillas limosas, y la parte inferior como limos arenosos.

Si comparamos ambos resultados, el CPTu 1 clasificaría el suelo de ese sector como arenoso, en cambio el ensayo CPTu 2 lo clasificarían como limos arenosos. Si se observa la ubicación del ensayo CPTu 2, estos se hallarían en el mismo sector que donde se extrajo la muestra, y por tanto los datos concuerdan con los resultados en el laboratorio.

6.5.3 Análisis de Sobreconsolidación de los suelos (OCR)

Debido a que la correlación de los datos de CPTu para hallar el parámetro de OCR, solo se pueden aplicar en arcillas sobreconsolidadas (no drenadas), surge el problema de no poder realizar una comparación del rango donde se extrajo la muestra bloque, debido a que no se clasifican (según la clasificación de Robertson y Schneider) como arcilla. Debido a esto, solo se puede realizar una comparación, pero en el conjunto del ensayo. En la siguiente tabla se muestra la comparación de los resultados obtenidos tanto del laboratorio como de los ensayos de CPTu

	OCR			OCR
	Robertson (2009)	Kulhaqy and Mayne (1990)		
CPTu 1	2,92	2,33	B6-PS	0,44
CPTu 2	3,10	2,45	B6-PI	0,54

Fig. 80 Tabla de valores de resultados de laboratorio y de campo del parámetro OCR.

En el primer cuadro se observan los datos promediados de los resultados del OCR en términos generales de los ensayos de CPTu. El segundo cuadro representa el promedio realizado de los resultados en el laboratorio de la parte superior e inferior de la muestra.

Como se observa al comparar ambos cuadros, los resultados de Laboratorio y los ensayos “in situ” de CPTu, presenta grandes diferencias, ya que los datos de los CPTu determinarían que los materiales estarían sobreconsolidados, con grandes valores. En cambio, los resultados de laboratorio muestran que el bloque inalterado estaría normalmente consolidado.

6.5.4 Estimación del módulo de Young (E)

Como se ha comentado en el apartado del CPTu con respecto al módulo elástico, esta correlación extraída en este ensayo, solo se obtendrían resultados óptimos para el caso de arenas. Esto produciría el mismo problema que el anterior apartado, porque, si se observan los modelos de clasificación, en el ensayo de CPTu 2 no se hallarían materiales granulares. Debido a esto, se utilizará el promedio general del ensayo. Aun observando este detalle, los datos que obtengamos pueden ayudar al estudio y entendimiento del comportamiento del bloque, ya que con los ensayos “in situ” no analiza su granulometría sino su comportamiento mecánico.

	E (kPa)		E (kPa)
	E		
CPTu 1	74295,12	B6-PS	6271,31
CPTu 2	87290,84	B6-PI	8245,92

Fig. 81 Tabla de valores de resultados de laboratorio y de campo del parámetro E.

Como podemos observar en la comparación de los datos, hay una gran diferencia entre ambos módulos, siendo inferior la del laboratorio. Esto muestra que los materiales “in situ” presenta una mayor rigidez, que los materiales de laboratorio.

Capítulo 7. Análisis de los datos de los ensayos DMT

7.1 Introducción

Como hemos visto en el apartado anterior, se han estudiado los datos de los ensayos de CPTu para poder hallar la composición de los materiales a través de su comportamiento mecánico, pero al intentar realizar el estudio de otros parámetros como el OCR y el módulo E, se observa que presenta discrepancias, no solo entre los ensayos, sino entre los diferentes modelos de los autores.

Debido a estos hechos, se procederá a analizar los datos obtenidos de los ensayos DMT realizados in situ, para poder así analizar los parámetros obtenidos en el laboratorio con la muestra bloque. Para ello se siguió el procedimiento normalizado A.S.T.M. Sub-Committee D18.02.10. 19986. En el apartado 2.2.3 se recoge una copia de las partes del ensayo y el espaciamiento de toma de medida es cada 20 cm.

A partir de los valores de P_0 y P_1 , se obtienen los tres parámetros intermedios característicos de este ensayo:

- I_D , Índice de Material, relacionado con el tipo de suelo.
- K_D , Índice de tensión horizontal, relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR).
- E_D , Módulo dilatométrico, determinado a partir de la teoría de la elasticidad.

A continuación se describe los conceptos básicos necesarios para la interpretación y valoración de los resultados

I_D , Índice de material o Tipo de suelo

Es definido por:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - U_0} = \frac{\Delta P}{P_0 - U_0}$$

donde u_0 es la presión intersticial.

En general I_D es indicativo del tipo de suelo. En el campo de los suelos cohesivos, no obstante, puede clasificar a un suelo arcilloso como limoso, y lo mismo sucede en una mezcla de arcillas y arenas, podría clasificarlo como limo. Por tanto, no responde a clasificación granulométrica, sino que refleja el comportamiento mecánico del medio.

K_D , Índice de tensión horizontal

Es definido por:

$$K_D = \frac{P_0 - U_0}{\sigma'_{v0}}$$

donde σ'_{v0} es la tensión efectiva vertical.

Este parámetro está relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR), puede decirse que representa el valor de K_0 amplificado por los efectos de la penetración de la paleta.

El perfil de K_D es similar al perfil del OCR, y por lo tanto, permite entender la historia tensional de un depósito.

E Módulo DMT

E_D se obtiene a partir de P_0 y P_1 a partir de la teoría de la elasticidad, siendo:

$$E_D = 38,2\Delta P$$

Este parámetro no debe ser usado en sí mismo como un módulo de deformación, debido a la falta de información de la historia tensional. Solo se debe ser utilizado en combinación con K_D e I_D , ni tampoco ser confundido con el módulo de Young.

A partir de estos parámetros intermedios, definidos anteriormente, se pueden estimar los parámetros geotécnicos clásico de resistencia de deformabilidad e historia tensional del suelo:

- Tipo de suelo (estratigrafía).
- OCR y K_0 en arcillas.
- C_u en suelos cohesivos.
- $DR\%$ y ϕ en suelos granulares.
- M y E en suelos granulares y cohesivos.

7.2 Estratigrafía

7.2.1 Introducción

Como se ha comentado anteriormente, I_D o Índice de material, no solo es un parámetro intermedio, sino que a través de él se puede extraer la estratigrafía teórica del subsuelo.

La definición anterior de I_D fue introducido habiendo observado que los perfiles de P_0 y P_1 son sistemáticamente cerrados el uno al otro en arcillas y distantes en la arena. A través de lo acordado por Marchetti (1980), el tipo de suelo puede ser identificado, como se muestra a continuación:

Arcilla	$0,1 < I_D < 0,6$
Limo	$0,6 < I_D < 1,8$
Arena	$1,8 < I_D < (10)$

Fig. 82 Tabla de clasificación de suelo a través del I_D

Este parámetro proporciona una expresión del perfil del tipo de suelo, y terrenos normales, una descripción razonable del terreno. Es verdad que algunas veces, se describe limos como arcillas, y viceversa. Esto sucede debido a que este parámetro, no describen una granulometría, sino el comportamiento mecánico del material. De hecho, si realmente uno quiere buscar más el comportamiento del material que su descripción en sí, muchas veces es usado este tipo de clasificación. Aunque por otra parte, la permeabilidad debería ser apoyada con el índice de presión de poro U_D .

Muchos autores han presentado diferentes modificaciones, sin embargo el gráfico original de comparación de los parámetros de I_D - E_D , es generalmente una buena aproximación para suelos “normales”. Por otro lado, el ámbito principal del gráfico no es una estimación precisa de γ , pero la posibilidad de construir un perfil aproximado de σ'_{v0} , es necesario para su elaboración.

7.2.2 Aplicación al caso

Como hemos realizado en el apartado de los ensayo CPTu, se puede tener una observación de la estructura estratigráfica del subsuelo a través de realizar el gráfico de I_D con respecto a la profundidad, y aunque se halla una menor precisión con respecto a la distinción de los materiales cohesivos, permite ver la estructura, diferenciando los estratos granulares con los cohesivos.

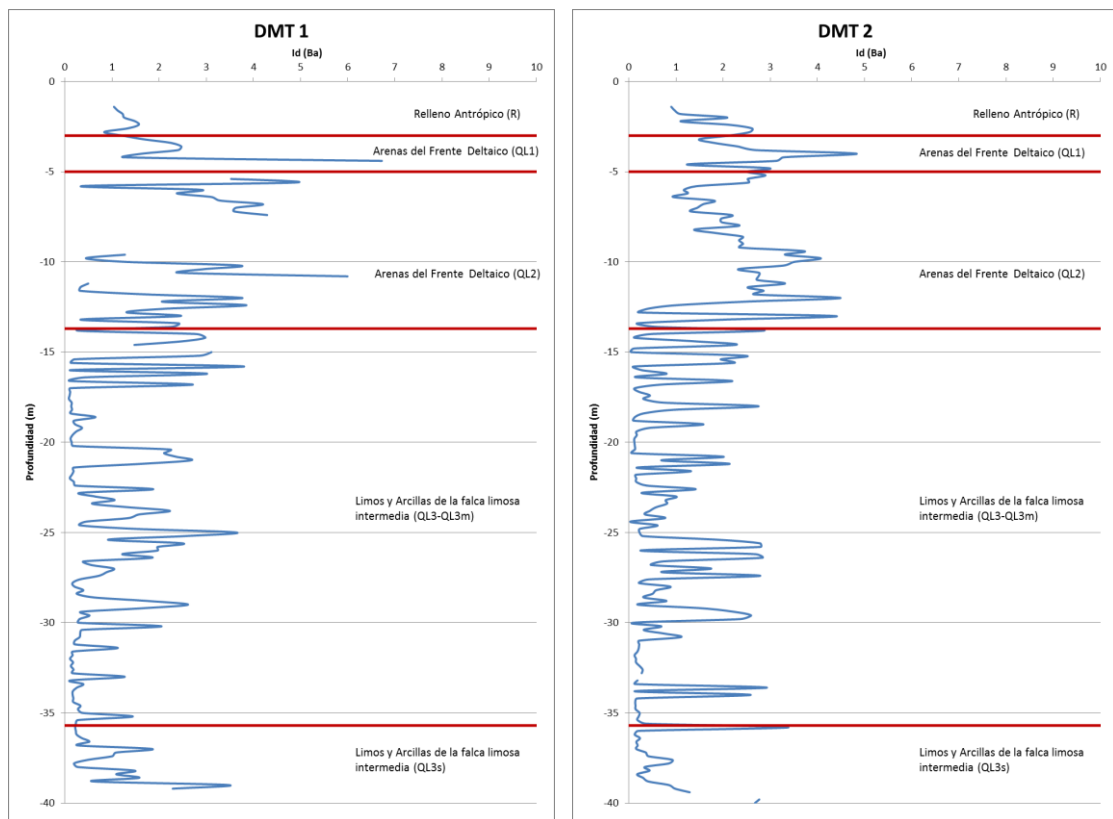


Fig. 83 Gráficos de la representación de I_D con respecto la profundidad.

En términos generales, se puede observar que el ensayo de DMT 1 muestra que hasta la profundidad de 15 m, se hallan paquetes de estratos arenosos, intercalados en minoría con estratos cohesivos, aunque se observa niveles esporádicos de materiales granulares de cierto tamaño. Posteriormente se observa entre los 20 a 25 m un inicio de estratos arenosos, hasta que pasamos a un nivel compuesto en su totalidad por materiales cohesivos. A partir de este puntos vuelven a hallar intercalaciones de estratos granulares finos con cohesivos, pero este paquete tiene una tendencia granulométrica negativa, hasta ser grandes paquetes de arcillas, intercalados con pequeños estratos arenosos.

A diferencia del anterior ensayo, el DMT 2 muestra un aumento de los materiales cohesivos con respecto al anterior. Aunque hasta los 15 metros, solo hallamos materiales granulares finos, la tendencia de los materiales siguientes es la disminución de los estratos granulares, y por tanto el aumento de los estratos cohesivos, hasta los 30 m, donde los estratos compuestos por materiales granulares serán esporádicos.

A través de lo comentado en el anterior apartado, se procederá a aplicarse sobre los datos extraídos de los ensayos “in situ” realizados en la estación Verge de Montserrat de la L9, diferenciando los niveles estratigráficos basados en el proyecto .

- Relleno Antrópico

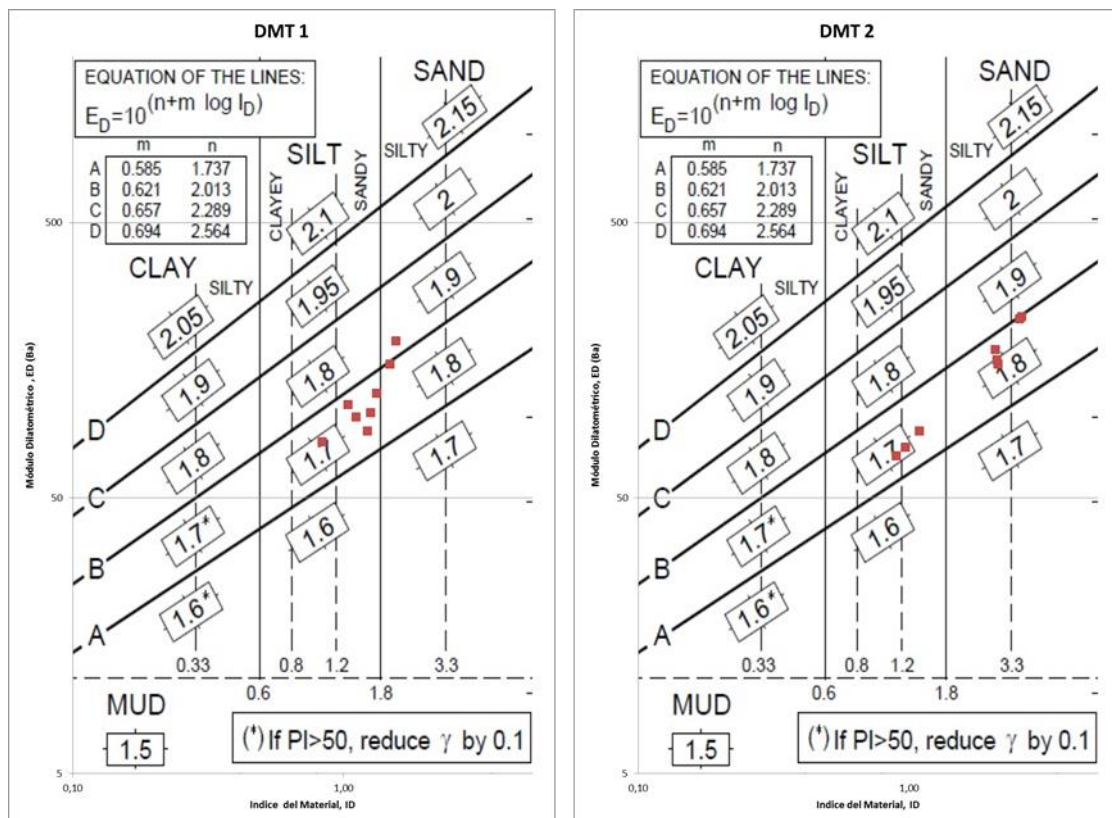


Fig. 84 Gráfico para estimar el tipo de suelo y la densidad (Marchetti & Crapps) en el nivel de relleno antrópico.

Si observamos el grafico de la izquierda, muestra los resultados de los datos del ensayo de DMT 1. Este muestra que los datos obtenidos de ese rango de profundidad, el material que predomina es limoso, aunque habría cierta proporción de limo arenoso.

Si se observa por el contrario, los resultados del ensayo del DMT 2 en el gráfico de la derecha, el material predominante a ese rango de profundidad estaría repartido por igual entre los materiales limosos, y arenas limosas.

A través de los gráficos también podemos observar la densidad de los materiales, donde observando con detenimiento, en ambos ensayos da los mismo resultados, siendo el limo arenoso de 1,7, y arenas limosas de 1,8.

- Arenas de Frente Deltaico (Unidad QL1)

Los datos del ensayo de DMT 1, muestran que los datos extraídos a la profundidad de este nivel corresponderían a materiales compuestos por limos arenosos y arenas limosas. Por tanto, este nivel correspondería a materiales granulares muy finos. Las densidades de los materiales de este ensayo corresponderían a las arenas limosas de 1,9-1,8, y los estratos esporádicos de limos arenosos, sería de 1,8-1,7.

Si observamos los datos extraídos del DMT 2, la diferencia que existe con respecto al anterior ensayo es la proporción de los materiales comentados, donde en este caso, hay una menor proporción de limos arenosos, siendo mayor la de arenas. En este caso, al ser principalmente arenas puras-limosas, la densidad de este material correspondería a 2-1,8.

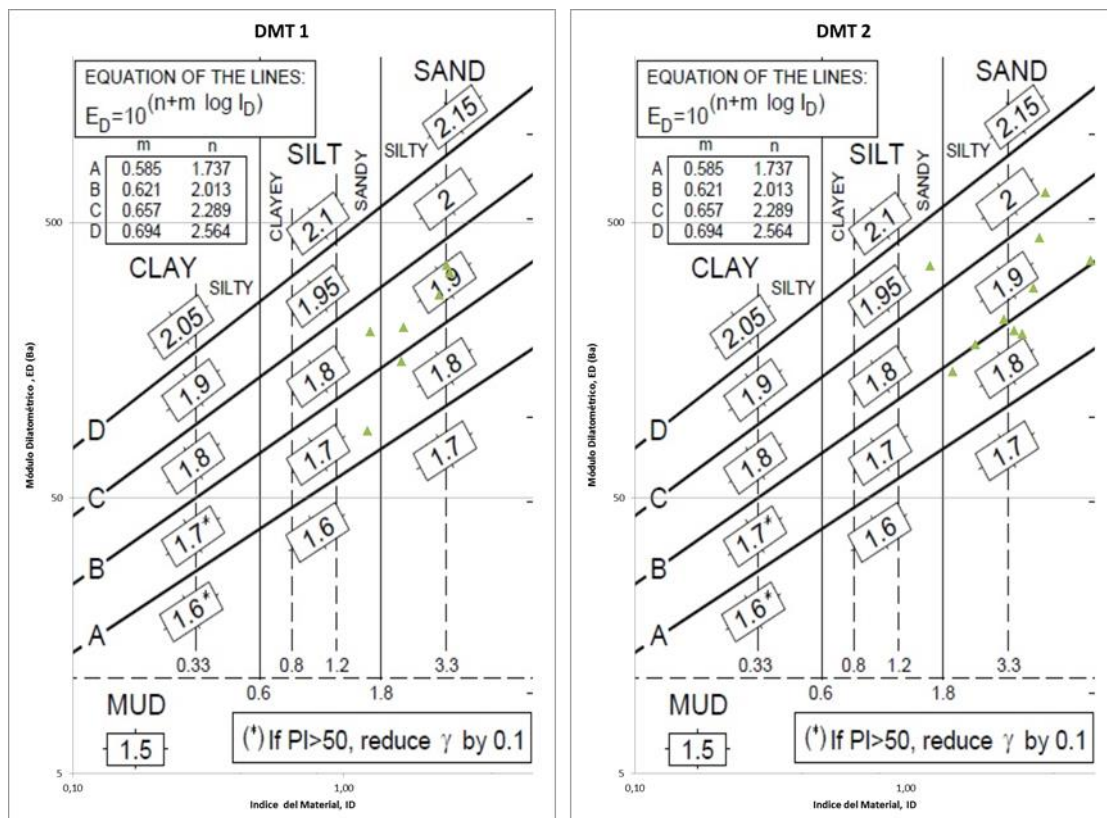


Fig. 85 Gráfico para estimar el tipo de suelo y la densidad (Marchetti & Crapps) en el nivel de arenas de frente deltaico (Unidad QL1).

- Arenas de Frente Deltaico (Unidad QL2)

El primer gráfico se muestran los datos del ensayo DMT 1 a profundidades marcadas como nivel QL2, donde, hay una distribución bastante heterogenia, donde es mayoritario los materiales arenosos (limoso y arcilloso), aunque también se hallan niveles de limos arenosos, y en menor proporción arcillas limosas. Probablemente, corresponderían a niveles intercalados entre los dos primeros, apareciendo de manera esporádica los niveles de arcilla. Si observamos las densidades teóricas que muestra el gráfico, las arenas presentarían densidades entre 2-1,8, en cambio en las arcillas y los limos arenosos sería 1,7.

Con respecto, a los datos del ensayo de DMT 2, tienen la misma tendencia que el anterior ensayo.

Como se puede observar a través de los datos proyectos en los gráficos, se muestra la gran diferencia que hay con respecto al anterior nivel, donde según documentos de la zona, se unen ambos niveles para realizar su estudio, debido a que presentan una similitud.

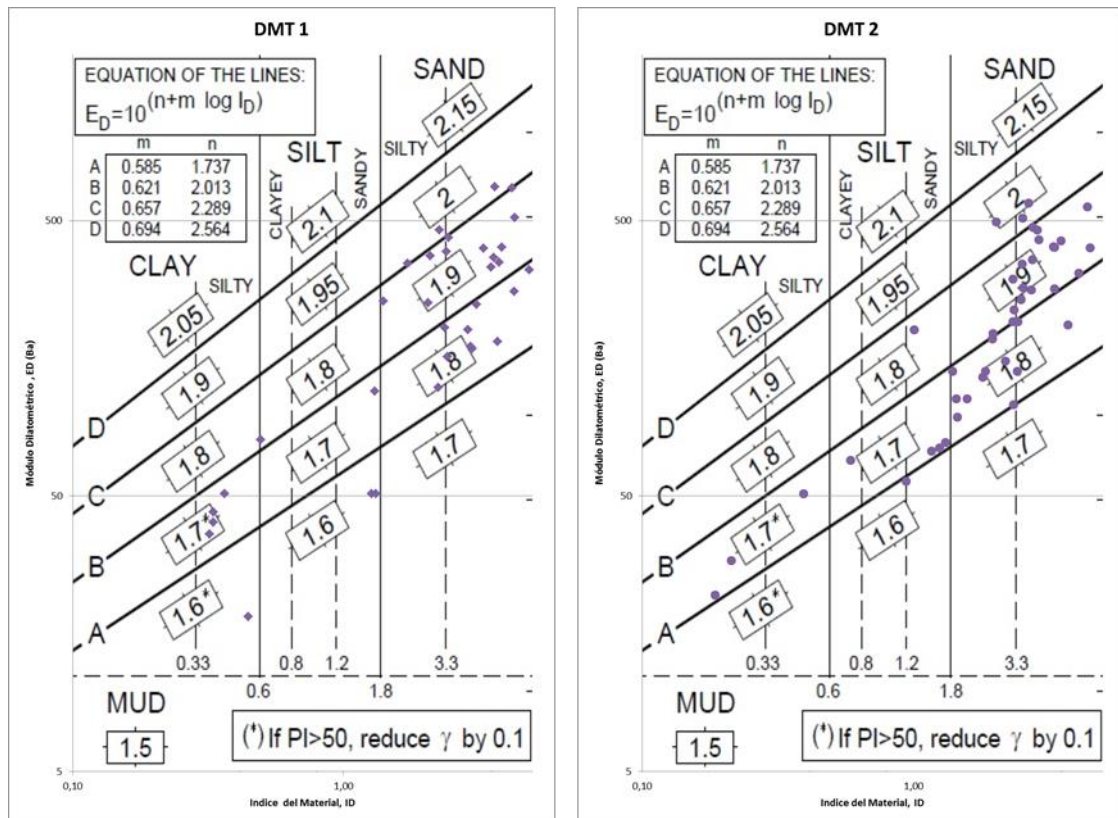


Fig. 86 Gráfico para estimar el tipo de suelo y la densidad (Marchetti & Crapps) en el nivel de arenas de frente deltaico (Unidad QL2).

- Limos y arcillas de la falca limosa intermedia (Unidad QL3-QL3m)

Como se observa en la descripción del título de este nivel, el sector correspondería teóricamente a niveles de materiales cohesivos principalmente. Al analizar los datos del ensayo DMT 1, se muestra que este nivel estaría compuesto por niveles cohesivos, siendo el más mayoritario limos y arcillas, siendo de mayor proporción las segundas, aunque también presentarían cierta proporción de arcillas limosas. También se puede observar que hay una cantidad importante de arenas (limosas y puras), mostrando las posibles intercalaciones con las arcillas al ir teniendo una distribución granulométría negativa. Los datos mostrarían que las densidades serían entre 2-1,9 en las arenas, y tanto en los limos como en las arcillas, presentan una densidad de 1,8.

En el ensayo DMT2, presenta las mismas tendencias, aunque se puede ver que la proporción de materiales granulares arena limoso, disminuye en detrimento al aumento de materiales limosos. Con respecto a las densidades, presentan los mismos datos, exceptuando las arcillas que serían de 1,6 a 1,8.

Estos datos de cambios granulométricos, pueden indicar la posición en que se hallarían en la falca, con respecto a las facies completas.

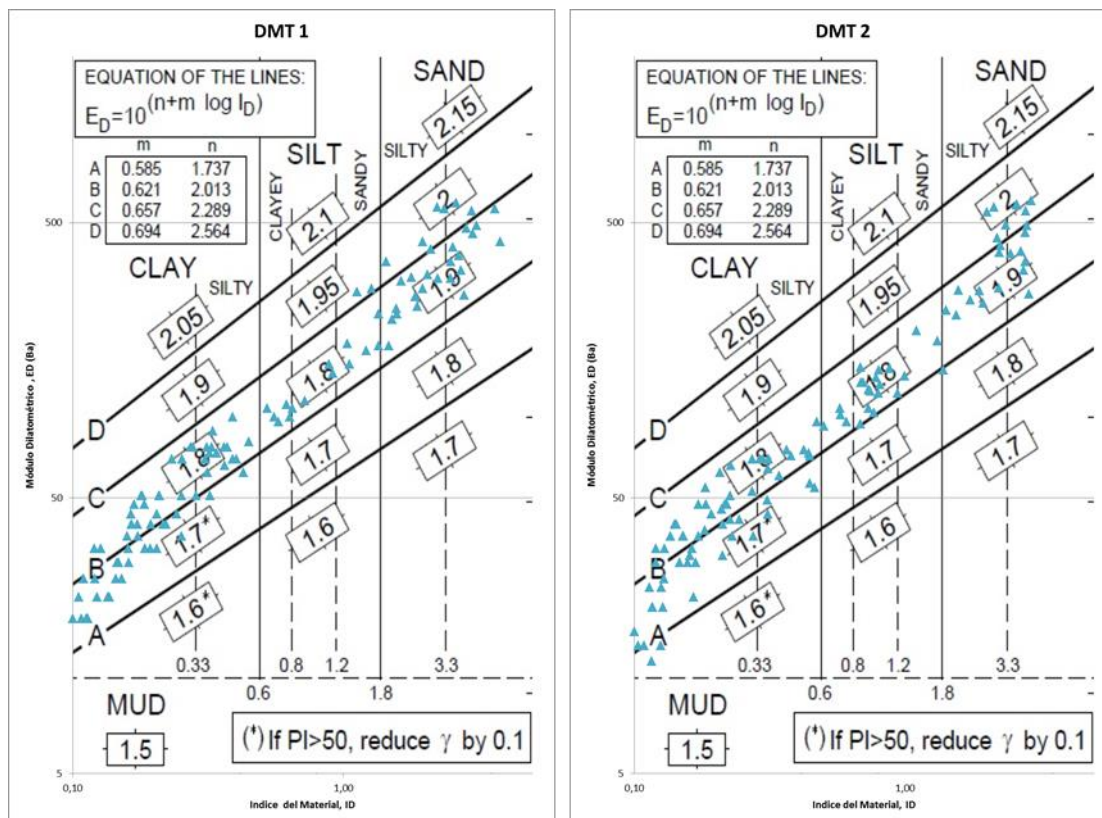


Fig. 87 Gráfico para estimar el tipo de suelo y la densidad (Marchetti & Crapps) en el nivel de Limos y arcillas de la falca limos intermedia (Unidad QL3-QL3m).

- Limos y arcillas de la falca limos intermedia (Unidad QL3s)

Según los datos de anteriores trabajos, este nivel correspondería a una formación limosa muy arenosa, con intercalaciones arenosas. Esta descripción es observable en el grafico del ensayo de DMT 1, aunque presenta cierta proporción de niveles arcillosos.

Esta descripción, no se haría efectiva en el caso del ensayo de DMT 2, donde la proporción de materiales arcillosos serian casi en su totalidad, apareciendo niveles de limo arenosos y arenas limosas.

Este último nivel, no es del todo preciso debido a la cantidad de datos extraídos por parte de los ensayos, pero pueden mostrar las posibles tendencias en ese sector.

Las densidades de los materiales serian prácticamente iguales en ambos ensayos, siendo las arenas puras y las arenas limosas de 2, los limos arenosos de 1,95-1,8 y las arcillas y arcillas limosas de 1,8.

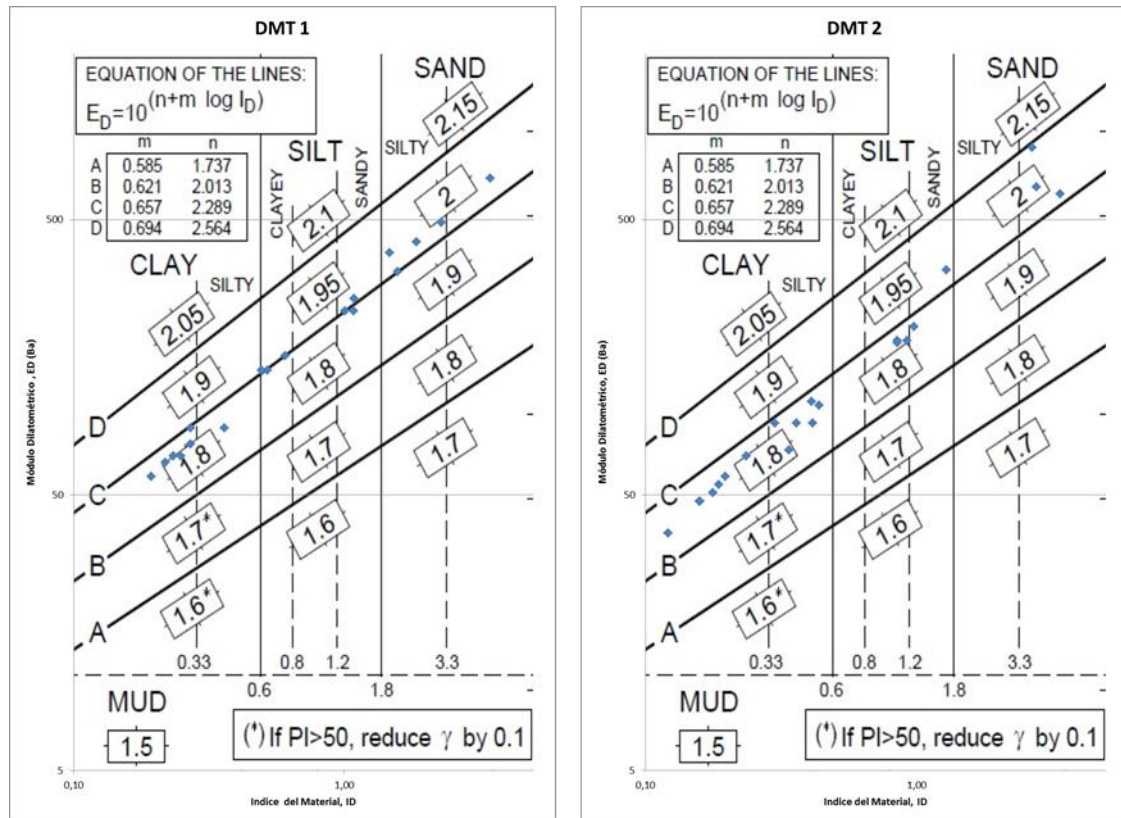


Fig. 88 Gráfico para estimar el tipo de suelo y la densidad (Marchetti & Crapps) en el nivel de Limos y arcillas de la falca limos intermedia (Unidad QL3-QL3m).

7.3 Análisis del Grado de Sobreconsolidación (OCR)

7.3.1 Introducción

En el caso de los materiales cohesivos, la correlación original para hallar este parámetro se derivaba del índice de tensión horizontal (K_D), propuesto por Marchetti (1980), dando la siguiente relación:

$$OCR_{DMT} = (0,5 K_D)^{1,56}$$

Esta relación fue derivada en correspondencia a un valor de $K_D = 2$ para suelos arcillosos no cementados normalmente consolidados (NC), tal como demuestran numerosas investigaciones.

La relación no es aplicable a arcillas sobreconsolidadas (OC) o cementadas. No se ha observado una única relación entre K_D y OCR para este tipo de suelos.

La determinación de OCR en arenas es más difícil que en arcillas. OCR en arenas es a menudo resultado de un complejo de historias de precarga o desecación u otros efectos. Más aun, mientras el OCR en arcillas puede ser determinado con edómetros, la perturbación de la muestra no permite la misma situación en las arenas.

Debido a esto, la única forma de obtener cierta información en arenas, es utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{M_{DMT}}{q_c}$$

Por tanto, OCR en arenas puede ser aproximadamente evaluado desde el rango M_{DMT}/q_c , usando las siguientes valores indicativos como una referencia: $M_{DMT}/q_c = 5-10$ en arenas NC, $M_{DMT}/q_c = 12-24$ en arenas OC.

El valor del parámetro α proporciona así una valoración de la historia tensional de los depósitos arenosos. La combinación de los ensayos CPT y DMT constituye una buena herramienta de investigación de campo para el estudio de estos sedimentos.

7.3.2 Aplicación al caso

Con esta premisa, se obtuvieron los resultados mostrados en el gráfico siguiente. Como se puede observar en la imagen, si dejamos a un lado las anomalías de los rellenos antrópicos, se muestra que la mayoría de los materiales se hallan sobreconsolidados, como también nos mostraba los datos de CPTu, en la parte superior, aunque de 20 a 30m, hay un gran número de estratos que los materiales arcillosos son normalmente consolidados, aunque, de nuevo aumenta el valor del OCR hasta valores que definen su comportamiento de materiales sobreconsolidados.

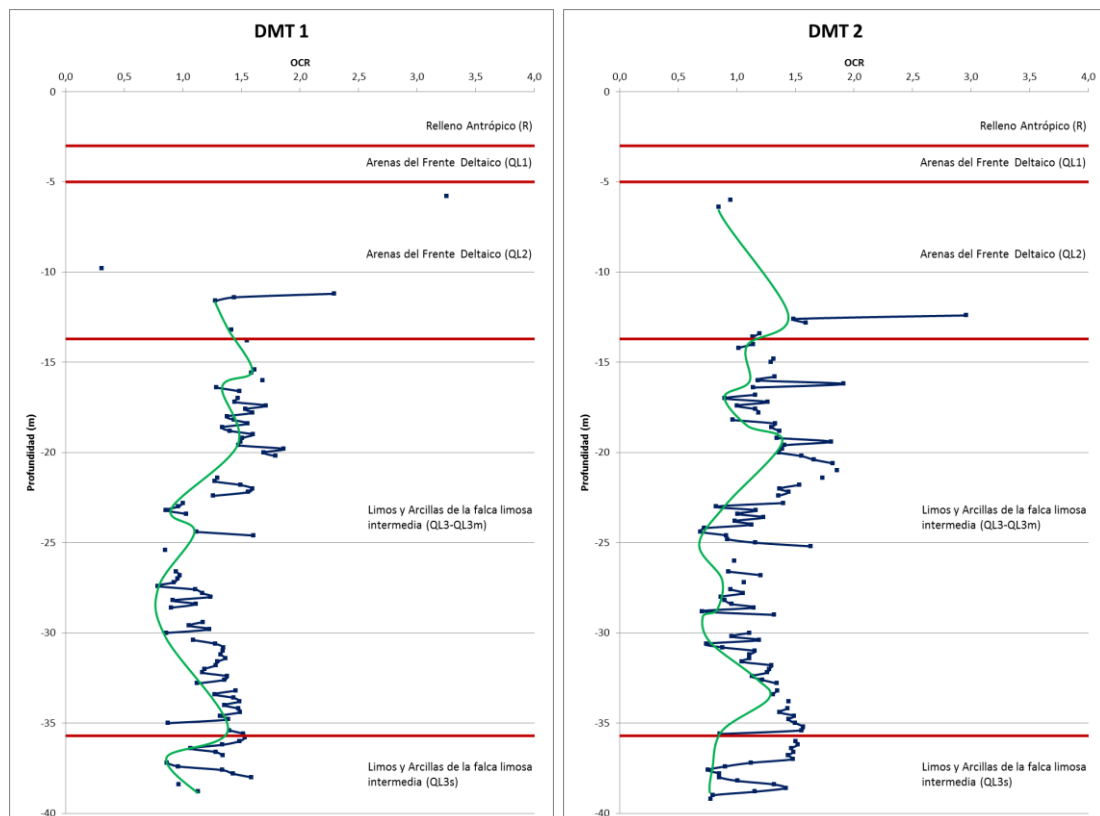


Fig. 89 Gráficas que muestran el OCR del subsuelo a través de los datos de los ensayos DMT.

7.4 Análisis del Módulo Elástico (M_{DMT})

7.4.1 Introducción

El módulo de M determinado a través del DMT corresponde al módulo vertical drenado (unidimensional) tangente a la presión de confinamiento σ'_{v0} del ensayo, y es igual al determinado al edómetro.

El ensayo DMT es el único ensayo geotécnico in situ que permite obtener este parámetro de forma directa, tanto en arenas como en arcillas.

M_{DMT} se obtiene por la aplicación de un factor de corrección R_M a E_D , siguiendo la expresión siguiente:

$$M_{DMT} = R_M E_D$$

Las ecuaciones que definen $R_M = f(I_D, K_D)$ (Marchetti 1980) se muestran a continuación:

$$\text{Si } I_D \leq 0,6 \quad R_M = 0,14 + 2,36 \log K_D$$

$$\text{Si } I_D \geq 3 \quad R_M = 0,5 + 2 \log K_D$$

$$\text{Si } 0,6 < I_D < 3 \quad R_M = R_{M,0} + (2,5 - R_{M,0}) \log K_D \text{ con } R_{M,0} = 0,14 + 0,15(I_D - 0,6)$$

$$\text{Si } K_D > 10 \quad R_M = 0,32 + 2,18 \log K_D$$

$$\text{Si } R_M < 0,85 \quad R_M = 0,85$$

Puesto que E_D es el módulo incorrecto, mientras que M es un módulo corregido, las propiedades de deformación serían en general derivadas de M y no de E_D , ya que, como muestra la experiencia que M es más reproducible, teniendo un rango de varios en bastante ejemplo de 0,4-400 MPa.

La comparación con los términos M_{DMT} - $M_{referencia}$, y en términos de predicción contra las medidas de asentamientos, el parámetro M obtenido a través del ensayo DMT, es más fiable y preciso que trabajar con el parámetro E_D . Este parámetro es usado de la misma forma como si se hubiera obtenido con otros métodos e introducido e uno de los procedimientos para evaluar asentamientos.

7.4.2 Aplicación al caso

Como se ha comentado anteriormente, el parámetro M_{DTM} , sería el módulo igualitario al del extraído del ensayo edométrico, por tanto, a diferencia de los ensayos de CPTu, los datos extraídos del DMT deberían proporcionar datos mucho más fiables.

Como se observa en el gráfico de DMT 1, la tendencia general es una serie de conjuntos de alternados con bloques de niveles rígidos con niveles blandos. Esto se observa en los primeros niveles de R y QL1, los materiales presentan valores altos de E , y posteriormente en QL2, se halla un primer nivel de materiales donde baja drásticamente el valor de E , mostrando que los materiales son más deformables y blandos que los superiores. Aproximadamente hacia los 13 metros, aparecen un bloque de materiales con un gran valor de E , siendo en conclusión más rígidos. Pero, a una profundidad de 17 metros, disminuye el valor de E , y comienza un conjunto de facias, donde se intercalan niveles rígidos, con niveles más blandos.

Si observamos el ensayo de DMT 2, podemos observar que estos bloques mencionados en el anterior párrafo, vuelve a repetirse, y correlacionarse con el perfil extraído del DMT 1, aunque se observan estratos diferentes. Esta tendencia se exceptúa con los rellenos antrópicos del inicio del ensayo.

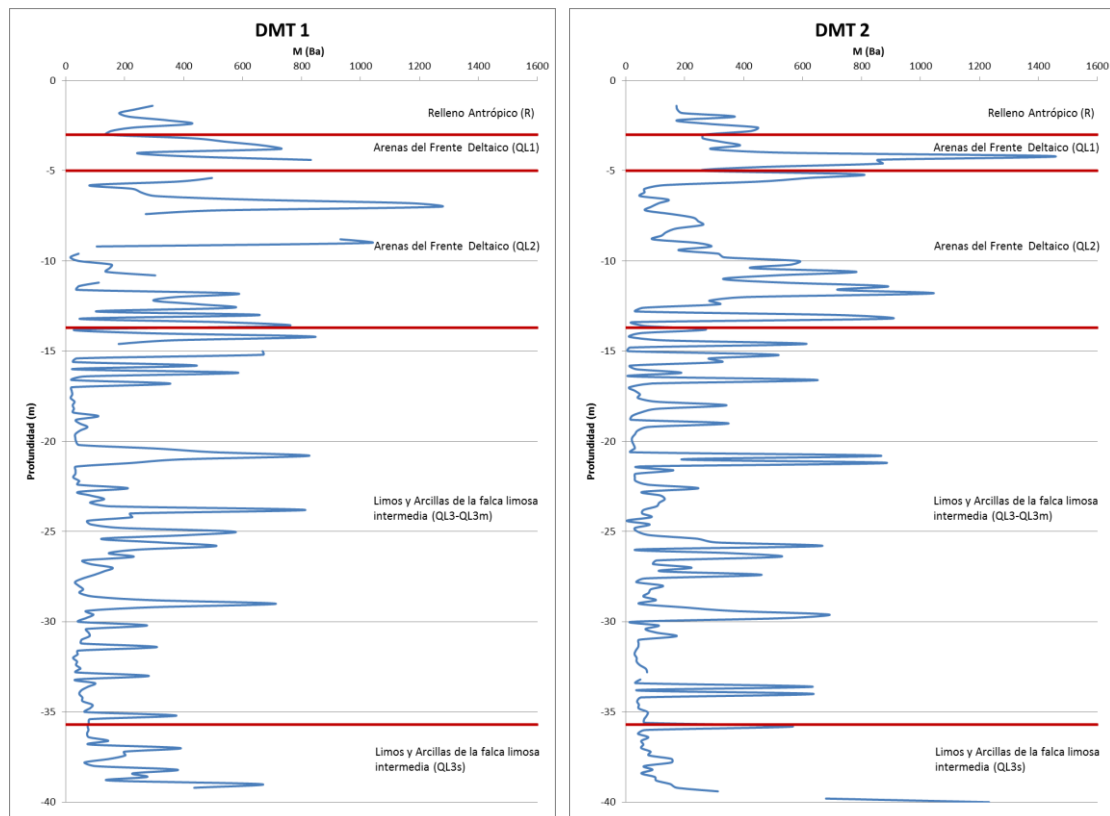


Fig. 90 Gráficas que muestran el E del subsuelo a través de los datos de los ensayos DMT.

7.5 Comparación de los resultados “in situ” con los de laboratorio

7.5.1 Introducción

A lo largo de este capítulo, se ha ido comentado los diferentes ensayos “in situ” de DMT se realizaron en la última campaña de campo en la construcción de la estación de metro de la L9, y también se ha trabajado con los datos que se extrajeron de campo para hallar la composición del subsuelo y los parámetros de resistencia y deformabilidad.

A través de estos resultados, se procederá a realizar una comparación de los datos obtenidos de los ensayos “in situ” con los datos extraídos de la muestra bloque 6, que se hallaría a una profundidad de -13 m a -13,5m.

7.5.2 Análisis de la estratigrafía

Como se ha observado, en ambos ensayos “in situ”, no se realiza un estudio directo del material, pero se puede observar la estratigrafía teórica que habría en el subsuelo a través de los parámetros de campo extraídos.

Aunque es verdad, que con estos ensayos la precisión para un sector concreto es baja, da cierta información general, que a través del resto de datos, puede proporcionar datos que se acerquen a la realidad.

Si observamos el gráfico del ensayo de DMT 1, los datos muestran que en el sector donde se extrajo el bloque muestra 6 los materiales que hallaríamos tendrían un comportamiento mecánico de arenas limosas, aunque también hallaríamos pequeños niveles de arcilla en medio de lo que correspondería al bloque. Estos mismos datos son corroborados por el ensayo de DMT 2 (mostrado a la derecha), aunque tiene una proporción mayor de arena pura.

Según los datos de laboratorio extraídos de la muestra bloque (figuras 36 y 37), esta se identificaría como la parte superior como arcilla limosa y la parte inferior como limo arenosa. Si comparamos ambos resultados, se puede observar que concuerdan.

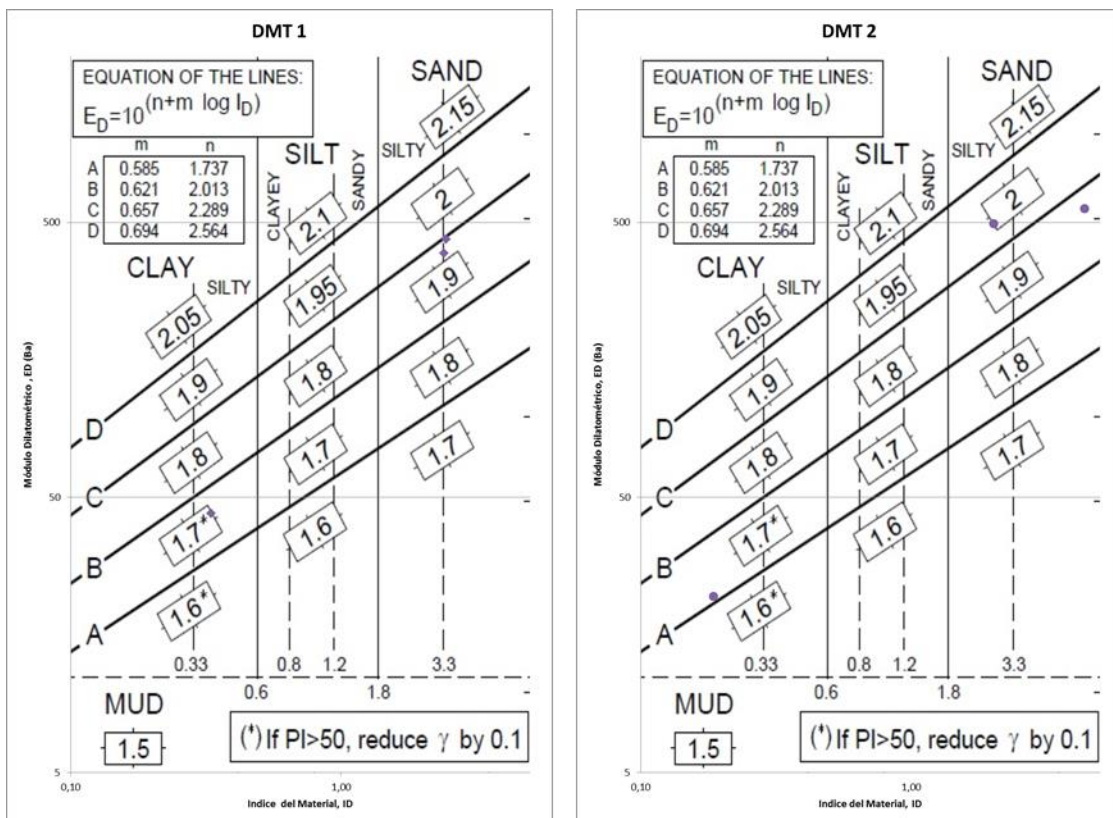


Fig. 91 Gráfico para estimar el tipo de suelo y la densidad (Marchetti & Crapps) en el rango de profundidad de la muestra bloque.

7.5.3 Análisis del grado de sobreconsolidación (OCR)

Como se ha comentado en el apartado perteneciente a la obtención de este parámetro a través de los ensayos de DMT, presenta una mayor precisión de los datos, aunque como se ha comentado, principalmente con las arcillas.

Las siguientes tablas muestran tanto los resultados de los ensayos “in situ” en el rango de profundidad de la muestra bloque inalterada como los resultados obtenidos en el laboratorio.

	OCR
DMT 1	1,4
DMT 2	1,2

	OCR
B6-PS	0,44
B6-PI	0,54

Fig. 92 Cuadros de comparación del OCR entre los ensayos DMT y los resultados de laboratorio.

Como podemos observar, los datos del DMT indican que los materiales de ese rango se hallarían sobreconsolidados, siendo este aspecto igual al comentado en el apartado de los ensayos CPTu, y por tanto, siendo contrarios a los resultados mostrados en el laboratorio, donde los datos muestran que los materiales se hallarían normalmente consolidados.

7.5.4 Análisis del Módulo Edométrico

Los siguiente cuadros muestran la comparación del modulo edométrico, obtenido a través de los ensayos de laboratorio, y los resultados del parametro M_{DMT} , obtenidos a través de los datos de los ensayos de DMT, en el rango de profundidad de la muestra bloque.

M (kPa)		
Profundidad (m)	DMT 1	DMT 2
-13,00	245,22	72567,17
-13,20	33,06	89182,81
-13,40	240,84	2116,04

	E (kPa)
B6-PS	6271,31
B6-PI	8245,92

Fig. 93 Cuadros de comparación entre el parámetro M de los ensayos DMT y los resultados de laboratorio.

A la izquierda se presentan los datos obtenidos del DMT en el rango de la profundidad donde se extrajo la muestra alterada. Como se puede observar en el primer ensayo, la zona intermedia presenta un nivel mucho más deformable y blando con respecto al límite superior e inferior, que aun sin tener un gran valor, presenta una mayor rigidez que la zona central.

Si se observa el ensayo DMT 2, en este sector el material es bastante rígido, aumentando conforme a más profundidad, pero llegando al límite inferior, disminuye considerablemente el módulo, dando a entender que hay unos materiales muchos más blandos que los que se hallan encima de este.

Capítulo 8. Conclusiones

En este trabajo se ha explicado de manera detallada, no solo las características de extracción y recubrimiento de los bloques, sino también la metodología de trabajo o la zona de almacenamiento, para demostrar los cuidados que se tenían con las muestras para mantener las lo más protegidas posibles de la alteración.

Y aun habiendo realizado estas acciones, se ha producido un grado significativo de alterabilidad sobre las muestras. Esto puede haber sido por causa de una metodología mal planteada, unas técnicas insuficientes, aunque lo más probable fuera por el hecho de haber pasado más de un año a temperatura ambiente, aun con todas las protecciones.

Pero al abrir las muestras estas aún estaban húmedas, y salvo los primeros centímetros de la superficie que presentaba alteración, por el ambiente y por la parafina, el material que se hallaba en el interior estaba intacto. Aunque se produjo un problema con el bloque 3, que se fragmentó, y produjo que no se aprovechara la muestra de manera intacta, sin alterar el cuerpo ni la composición de estas. Pero aun así pudimos aprovechar una parte de los fragmentos para realizar algún ensayo mecánico, y la caracterización.

Como se ha comentado los Bloques 3 y 6, corresponderían a los niveles de QL2, respectivamente, y si se comparan los parámetros de ambos, se observa que aproximadamente, todos los parámetros que se miden directamente sobre la muestra (densidad, humedad,), refiriendo a la caracterización básica del materia, ambos coinciden en la mayoría de los casos.

Los resultados edométricos también muestran una coincidencia aceptable con los datos recabados de estudios anteriores.

Lamentablemente la mayoría de los ensayos de corte no han dado resultados explotables pues no se alcanzó una rotura definida en muchos de ellos y el equipo se dañó a mitad de campaña.

Los ensayos “in situ” han mostrado que el análisis estratigráfico coincide con los datos obtenidos en el Laboratorio, y a través de los diferentes perfiles de q_c , U y I_D , se puede ver la complejidad que tiene este tipo de subsuelos.

Los datos del grado de sobreconsolidación (OCR) y el módulo de Young (E), presentan una gran diferencia con respecto a los datos de Laboratorio. Ya sea porque las muestras se hallan alteradas como la dificultad de estos ensayos de obtener datos precisos de una sección en concreto, se observa que presentan la misma tendencia en ambos casos, donde en el OCR son de valores bajos.

A pesar de las limitaciones reseñadas, se cree que los datos experimentales obtenidos durante la tesina pueden contribuir a futuros trabajos de caracterización geotécnica en el Delta del Llobregat.

REFERENCIAS

- GENS A. *Mejoras del Terreno [Apuntes de Asignatura Ingeniería Geotécnica]*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- GENS A., VAUNAT, J. *Cimentaciones [Apuntes de Asignatura Ingeniería Geotécnica]*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España
- GONZÁLEZ DE VALLEJO L., FERRER M., ORTUÑO, L.; OTEO, C. 2004 *Ingeniería Geológica*. Ed. Pearson Educación S.A.
- JIMÉNEZ SALAS J.A.; DE JUSTO ALPAÑES, J.L. 1975. *Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas*. Ed. Rueda. 2ª Edición
- KULHAWY F.H., MAYNE P.W. *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design* EL-6800, Research Project 1493-6. Prepared for Electric Power Research Institute
- MARCHETTI S., MONACO P., TOTANI G., CALABRESE M., 2001, *The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations*, Report of the ISSMGE Technical Committee 16 on Ground Property Characterisation from In-situ Testing. Washington D.C.
- MAYNE Paul W. 2007. *Final Report: NC Project 20-05, Topic 37-14, Cone Penetration Testing State-of-Practic*. Presentation to IDEA and Synthesis Studies Transportation Research Board. Washington.
- PELÁEZ NOVA, R.R. 2013. *Congelación artificial de dos suelos naturales. Un enfoque experimental con desarrollo de equipo*.
- PINEDA, J.A. et al GENS, A. 2013 *Testing block samples from silty deposits*.
- PINEDA, J.A. 2010 *Extracción de muestras bloque de arena y arcilla en la estación Virgen de Montserrat (L9) de Barcelona*
- SAU VALENZUELA, N. *Cat scanner as a tool for geotechnical simple inspection*. Tesina (Máster de Ingeniería del Terreno y Sísmica) Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela de Caminos. 2013
- SCHNEIDER James A. et al. 2008. *Analysis of Factors Influencing Soil Classification Using Normalized Piezocone Tip Resistance And Pore Pressure Parameters*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, VOL. 134, N°11, Noviembre 1, 2008 ASCE, ISSN: 1090-0241/2008/11-1569-1586.
- SCHNEIDER J.A et al. *Influence of partial consolidation during penetration on normalized soil classification by piezocone*. Geotechnical and Geophysical Site Characterization – Huang & Mayne (eds) 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46936-4
- ROBERTSON, P.K., CABAL, K.L. 2015. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* 6th Edición ed. Gregg Drilling & Testing, Inc.

ROBERTSON P.K. 2009 *Interpretation of cone penetration test – a unified* Can Geotech. J. Vol. 46, pp. Ed. NCR Research Press

ROBERTSON P.K. *Soil behaviour type from the CPT; an update*. Gregg Drilling & Testing INC., Signal Hill, California, USA.

UTE INPASA-PEYCO 2007. *Proyecto Constructivo de la L9. Prolongación de la Línea 9 del metro de Barcelona variante del Prat de Llobregat, Apéndice N°12,3, Estación Verge de Montserrat, Parámetros geotécnicos característicos del Terreno.*